



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Eléctrica

Revisión teórica de las descargas parciales en corriente continua.

Autor:

Alejandro García García

Tutora:

Mónica Victoria Rojas Moreno

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Leganés, Marzo 2016

Agradecimientos

Siempre se ha de tener en cuenta el camino que se recorre en la vida, y las personas que te acompañan, personas que siempre han estado ahí y no se las ve.

En primer lugar agradecer el esfuerzo de guiarme, ayudarme y asesorarme a mi tutora, Mónica Victoria Rojas Moreno.

A mis amigos Ganesh y Marina, que me han apoyado en este largo camino de la carrera y de los que he recibido mucho amor y sonrisas en tiempos duros.

A Pili, por estar cuando mi vida era un sinfín de momentos duros, y sobre todo por seguir aún ahí.

A Miki, David, Luis y Miguel, los cuales me brindaron muchas alegrías en esta época universitaria.

Agradecer a mi familia, Guillermo que los límites no sean otros que los que te marques tú, a mis abuelos Celestino y María con los que aprendí el sacrificio de la vida y especialmente a mi madre M^a. Carmen, sin tu esfuerzo de educarme ni tu amor incondicional no habría llegado a donde estoy.

Y a ti, Cris, que has sido mi apoyo en momentos duros, sin tu comprensión y consejos en esos momentos no creo que hubiera sido capaz de sacar nada.

Muchísimas gracias.

Índice

Agradecimientos.....	3
Índice.....	4
Índice de figuras.....	5
Índice de tablas.....	8
1. Introducción.....	9
1.1. Objetivos.....	9
1.2. Alcance del trabajo.....	9
1.3. La electricidad y HVDC.....	10
2. Descargas parciales (DP).....	14
2.1. Generalidades.....	14
2.2. Métodos de detección.....	17
3. Análisis de DP en corriente continua.....	22
3.1. Introducción.....	22
3.2. Comparación de descargas parciales en CC.....	22
3.2.1. Representación.....	22
3.2.2. Estudio estadístico.....	28
3.2.3. Otras alternativas.....	34
4. Conclusiones.....	43
5. Bibliografía.....	45
Anexo A.....	49

Índice de figuras

Fig. 1. Relación pérdidas potencia/longitud para línea de 1200 MW	10
Fig. 2. Relación pérdidas económicas/longitud para línea de 1200 MW	11
Fig. 3. Representación de torres según corriente alterna o continua a una potencia de 1000 MW.....	11
Fig. 4. Líneas construidas de HVDC hasta el año 2000.....	12
Fig. 5. Esquema de conexión de tensión continua.....	13
Fig. 6. Cavidades en sistemas de aislamiento sólidos.	15
Fig. 7. Ejemplo de arborescencia.....	16
Fig. 8. Esquema de descarga parcial interna.	16
Fig. 9. Esquema de descarga parcial superficial.....	16
Fig. 10. Esquema de descarga parcial corona.....	17
Fig. 11. Método directo.	20
Fig. 12. Método indirecto.	20
Fig. 13. Representación en elipse	24
Fig. 14. Representación onda sinusoidal	24
Fig. 15. Descargas parciales consecutivas en corriente continua	24
Fig. 16. Comparación entre esquemas de PRPD y TRPD.....	25
Fig. 17. Representación de patrón de una descarga parcial interna en CA	25
Fig. 18. Representación de patrón de una descarga parcial interna en CC.....	26
Fig. 19. Representación de patrón de una descarga parcial superficial en CA.....	26
Fig. 20. Representación de patrón de una descarga parcial superficial en CC.....	27
Fig. 21. Representación de una descarga parcial corona en CA.....	27
Fig. 22. Representación de una descarga parcial corona en CC.....	28
Fig. 23. Ejemplo de distribuciones estadísticas para diferentes defectos de descarga parcial en corriente continua.....	29
Fig. 24. Posibles sesgos	30
Fig. 25. Posibles curtosis	30
Fig. 26. Ejemplo de huella dactilar para corriente alterna.....	32
Fig. 27. Ejemplo de huella dactilar para corriente continua.....	32
Fig. 28. Conjunto de histogramas de densidad de probabilidad de descargas parciales	33
Fig. 29. Histogramas tridimensional $H_n(q, \Delta t_{pre})$ y $H_n(q, \Delta t_{suc})$ para CC.....	34

Fig. 30. Histograma tridimensional de descarga parcial interna en CC	34
Fig. 31. Histograma tridimensional de descarga parcial superficial en CC	35
Fig. 32. Histograma tridimensional de descarga parcial corona en CC	35
Fig. 33. Parámetros básicos de la estandarización de PSA	36
Fig. 34. Ejemplo de patrón de PSA aplicando las iteraciones	37
Fig. 35. Objeto de ensayo para descargas parciales interna	37
Fig. 36. Objeto de ensayo para descargas parciales superficiales	38
Fig. 37. Objeto de ensayo para descargas parciales corona.....	38
Fig. 38. Patrón PSA aplicando 18kV en descarga parcial interna con CA.....	38
Fig. 39. Patrón PSA aplicando 24kV en descarga parcial interna con CA.....	39
Fig. 40. Patrón PSA aplicando 3kV en descarga parcial superficial con CA.....	39
Fig. 41. Patrón PSA aplicando 6kV en descarga parcial superficial con CA.....	40
Fig. 42. Patrón PSA aplicando 10kV en descarga parcial corona con CA.....	40
Fig. 43. Patrón PSA aplicando 14kV en descarga parcial corona con CA.....	41
Fig. 44. Esquema de objeto de ensayo para descarga parcial interna en aceite.....	41
Fig. 45. Esquema de objeto de ensayo para descarga parcial corona.....	42
Fig. 46. Descarga parcial interna en aceite con AC a 10kV	43
Fig. 47. Descarga parcial interna en aceite con DC+ a 40kV	43
Fig. 48. Descarga parcial interna en aceite con DC- a 40kV	43
Fig. 49. Descarga parcial corona con AC a 6kV	44
Fig. 50. Descarga parcial corona con DC+ a 40kV	44
Fig. 51. Descarga parcial corona con DC- a 40kV	44
Fig. 52. Idea fundamental y magnitudes básicas para CAPD	45
Fig. 53. Ejemplo de a) Relación entre tiempos consecutivos b) relación entre cargas consecutivas.....	46
Fig. 54. a) Relación entre tiempos consecutivos b) relación entre cargas consecutivas en descarga parcial interna en CC aplicando 18 kV	46
Fig. 55. a) Relación entre tiempos consecutivos b) relación entre cargas consecutivas en descarga parcial superficial en CC aplicando 56 kV	47
Fig. 56. a) Relación entre tiempos consecutivos b) relación entre cargas consecutivas en descarga parcial corona con CC aplicando 68 kV	47
Fig. 57. Relación entre magnitudes de tiempo	48
Fig. 59. Relación entre magnitudes de tensión.....	48

Índice de Tablas

Tabla 1. Asignación de la variable a respecto a los parámetros de PRPD y de TRPD.....	28
Tabla 2. Comparación entre métodos basados en TRPD, en PSA y en CAPD.....	51

1. Introducción.

1.1 Objetivos.

El objetivo principal es el estudio de descargas parciales en corriente continua, apoyándose en la comparación con las descargas parciales en corriente alterna.

1.2 Alcance del trabajo.

Capítulo 1.

En este capítulo se describen los objetivos del proyecto e incorpora una introducción a la alta tensión en corriente continua, es decir, a la HVDC (High Voltage Direct Current).

Capítulo 2.

Trata de las descargas parciales, tanto sus características, su clasificación y los métodos de detección recogidos en las normativas.

Capítulo 3.

Este apartado se centra en la comparación en las descargas parciales en corriente continua y corriente alterna, a través de las representaciones y los patrones entre las mismas, para la caracterización de las descargas parciales según su naturaleza.

Capítulo 4.

Finalmente se cierra este trabajo con unas conclusiones donde se reflexiona sobre las descargas parciales en corriente continua.

1.3 La electricidad y HVDC.

El origen de la electricidad es la corriente continua. En 1882 se construye la primera estación de generación de la mano de Thomas Edison en Pearl Street, Nueva York. Esta central fue diseñada para proveer de energía al distrito financiero llamado así debido a la ubicación próxima a New York Stock Exchange o Bolsa de Nueva York. La energía estaba producida por un grupo de seis “dinamos”¹ diseñadas por Edison de 100 kW con carbón como combustible, cada uno capaz de proporcionar luz a 1200 bombillas. Al aumentar el mercado, se hizo necesario unas centrales eléctricas mayores que eran inviables en las proximidades de los consumidores. Las pérdidas por el efecto Joule eran enormes con el sistema de corriente continua, lo que acarrea un gran coste.

La guerra de las corrientes acababa de empezar. El dominio de la corriente continua fue breve y los defensores de la corriente alterna, con Nikola Tesla a la cabeza, demostraron sus ventajas. Al hacer posible el aumento y disminución de la tensión de una manera sencilla y barata por medio de los transformadores, se minimizan las pérdidas por efecto Joule que tantos problemas daban en la corriente continua y posibilitan el traslado de las centrales a lugares más lejanos de los consumidores. La guerra de corrientes terminó con la victoria de la corriente alterna dejando a la corriente continua reducida a pequeños campos, como los ferrocarriles.

Los estudios de la transmisión de corriente continua no son abandonados nunca, aunque la mayoría no llegaron a término real. La primera incursión tangible en el transporte de Alta Tensión en Corriente Continua se llevó a cabo gracias a Uno Lamm con su válvula rectificadora de selección de vapores de mercurio. Esta tecnología fue iniciada en 1954 con la construcción de la línea que conecta la isla de Gotland con la península de Suecia [Long; Nilsson, 2007].

Así pues, cuando se habla de Alta Tensión en Corriente Continua (HVDC) se habla principalmente de una tecnología de transporte. Las ventajas de los sistemas HVDC frente a los tradicionales sistemas HVAC son los siguientes:

¹ Llamados también “Jumbo dynamos”, debido a su gran tamaño y peso en referencia a Jumbo considerado como el rey de los elefantes, gracias a una mejora de Edison en los conmutadores de la época, se lograba una transmisión directa más eficiente. [ASME, 1980].

- *La potencia del sistema* en HVDC es totalmente activa por lo que no será necesario el uso de métodos de compensación de reactiva, frente al sistema HVAC que consume potencia reactiva y hace que en ocasiones sea necesario el uso de métodos de compensación.
- *La posibilidad de interconexión* de sistemas que operen con diferente frecuencia, es decir la unión de dos sistemas trabajando, uno a 50 Hz y otro a 60 Hz. Dada la imposibilidad de sincronía entre los mismos es necesario el uso de la corriente continua.
- *Menores pérdidas en términos de potencia* en función de la longitud, ver Fig. 1.

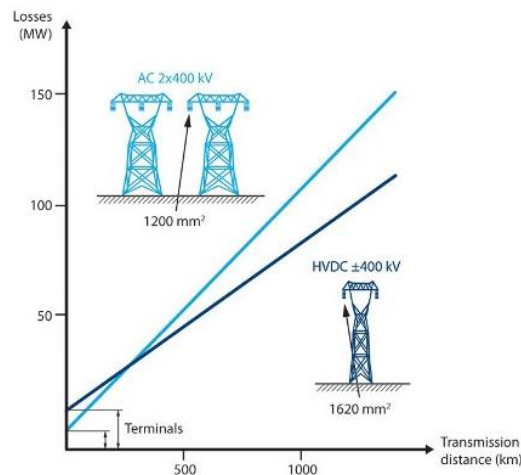


Fig. 1. Relación pérdidas potencia/longitud para línea de 1200 MW [ABB, 2015].

- Del punto anterior se derivan *las menores pérdidas económicas*, ver Fig. 2. Se observa que los costes iniciales son mayores en corriente continua que en corriente alterna. Esto se debe a las subestaciones ya que incrementan los costes por el proceso de transformación de corriente alterna a continua y su posterior transformación de nuevo a alterna en el otro extremo de la línea. Sin embargo se puede observar un punto en el cual los costes se cortan, llamado punto de equilibrio. Este punto, en líneas aéreas corresponde a una distancia de unos 600 km, mientras que en líneas submarinas rondan los 20 km.

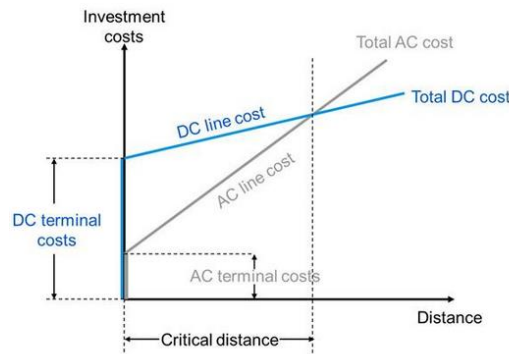


Fig. 2. Relación pérdidas económicas/longitud para línea de 1200 MW [ABB, 2015].

- *Menor impacto visual* en primer lugar, las torres son de menor tamaño que las de corriente alterna a una misma potencia y los corredores también son de menor tamaño [Woodford, 2005]. Ver Fig. 3.
- *Menor sección de cable* al no producirse el efecto pelicular.

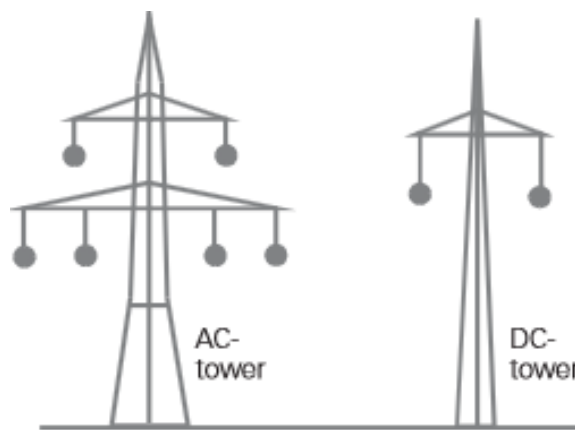


Fig. 3. Representación de torres según corriente alterna o continua a una potencia de 1000 MW [Siemens].

El número de líneas que emplean esta tecnología se ha ido aumentando con el transcurso de los años llegando a una potencia total de aproximadamente de 50000MW hasta el año 2000 como se refleja en la Fig. 4[CESI, 2008].

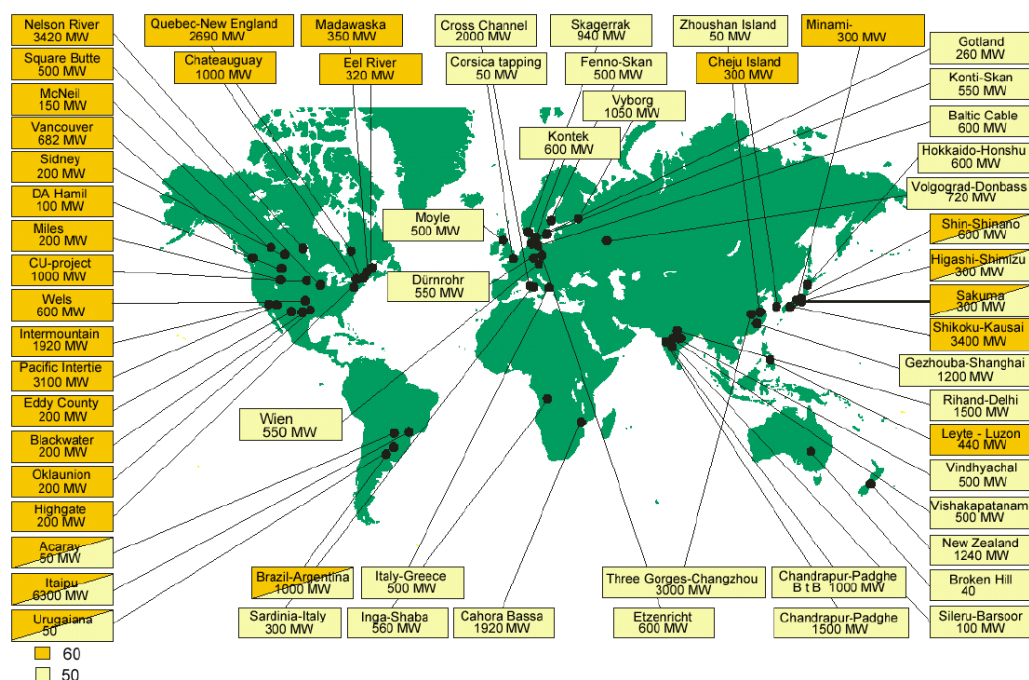


Fig. 4. Líneas construidas de HVDC hasta el año 2000 [Siemens].

En España la primera incursión de la tecnología HVDC fue llevado a cabo por el proyecto Rómulo, una iniciativa promovida por Red Eléctrica Española que supuso un desembolso de más de 420 millones de euros. Este proyecto supone la interconexión de las Islas Baleares (concretamente Mallorca) con la Península Ibérica. Esta conexión no viene reflejada en la imagen anterior por el hecho de haberse llevado a cabo en el año 2012. La eficacia de esta nueva tecnología desembocó en grandes beneficios, por una parte las emisiones producidas por la generación eléctrica se vieron reducidas en más de 285.000 toneladas de CO₂ durante el primer año, lo que implicó un acercamiento al Protocolo de Kioto de alcanzar un mínimo del 20% de emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora en la eficiencia energética. Por otra parte se consigue un ahorro monetario de más de 30 millones al año derivados del ahorro de compra de derechos de CO₂ y por pérdidas [REE, 2012].

Tradicionalmente los cables utilizados en HVDC, siguen siendo los cables de aislamiento de papel impregnado en aceite. Aunque con el objetivo de reducir costes se trabaja en cables de aislamiento extruído principalmente polietileno reticulado (XLPE) [Marzinotto, Mazzanti, 2015].

El esquema fundamental de la conexión de tensión continua es como el de la Fig. 5, este esquema representa la totalidad de las redes de transporte HVDC. Las dos redes en corriente alterna son unidas mediante una conexión continua a través de una subestación de conversión AC/DC y en el otro extremo a su vez una subestación de conversión DC/AC. Es imprescindible el disponer de una conexión de retorno que asegure el cierre del circuito.

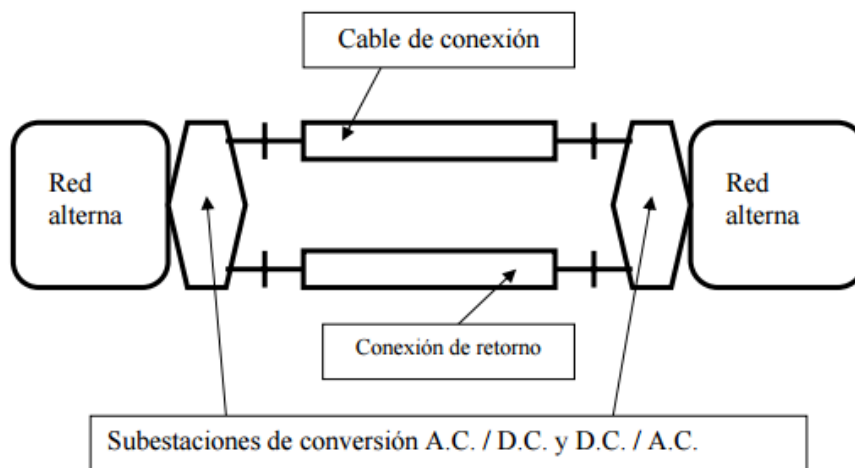


Fig. 5. Esquema de una conexión de tensión continua [CESI, 2008].

En otros ámbitos también se usa la HVDC como es el caso de los rayos X con aplicaciones médicas, los cuales trabajan en unos valores comprendidos entre 30 y 150 kV [Goldstein, Newbury, Echlin, Joy, Fiori, Lifshin, 2013].

2. Descargas Parciales (DP).

Hablar de descargas parciales, es adentrarse en una rama de la electricidad de una gran importancia. Y es gracias a que la medición de las mismas aporta mucha información del dieléctrico. Es por ello que el estudio de DP se ha visto incrementado por medio de multitud de técnicas.

2.1. Generalidades.

Pero, ¿qué es una descarga parcial? Una descarga parcial es una ruptura eléctrica que se produce en una vacuola o espacio de aire dentro de un dieléctrico (ya sea sólido, líquido o gaseoso), en la frontera de dos materiales (siendo posible que uno de ellos sea un gas) o entre punta y plano. La descarga parcial se produce por la ionización de los átomos del gas, a consecuencia de un aumento en el campo eléctrico. Esta ionización produce un pulso de corriente de muy baja amplitud de corta duración [UNE-EN 60720].

La magnitud, la cantidad y la evolución de las descargas parciales dependen de diferentes factores, cuya variabilidad hace que tenga un comportamiento estocástico [Van Brunt, 1991]:

- El tipo de impureza.
- Los factores ambientales.
- La presión en la cavidad.
- Las características y el estado del aislante.
- La naturaleza de la misma.
- La tensión aplicada al dieléctrico.
- La geometría de los defectos.

Las descargas parciales comportan una serie de consecuencias que pueden darse por separado o varias de ellas en un mismo caso:

- La emisión de radiación ultra-violeta.
- La formación y la emisión de gases. Es el caso de la emisión de ozono que al contacto con el nitrógeno, producen ácido nítrico.
- La potencia eléctrica se disipa en forma de calor, lo que comúnmente se denomina *calentamiento del dieléctrico*.

- La erosión del material provocada por impacto directo de electrones de alta energía o iones.
- El ruido en frecuencias audibles o ultrasónicas, que pueden llegar a producir interferencias en comunicaciones.

Las descargas parciales pueden darse de diferentes maneras y en diferentes sitios. A la hora de estudiarlas se dividen según su origen: internas, superficiales y coronas.

- ***Descarga parcial interna.***

Son las descargas parciales que se producen en vacuolas de gas en el interior de un medio aislante. La descarga hace que la superficie de la vacuola se cargue provocando la posterior extinción de la misma. La existencia de vacuolas no precisa de un único modelo, sino que es diverso como se aprecia en el ejemplo de la Fig. 6. En el caso de producirse en un tiempo prolongado, se producen las arborescencias, mostradas en la Fig. 7, la cual supone con el paso del tiempo la perforación del dieléctrico.

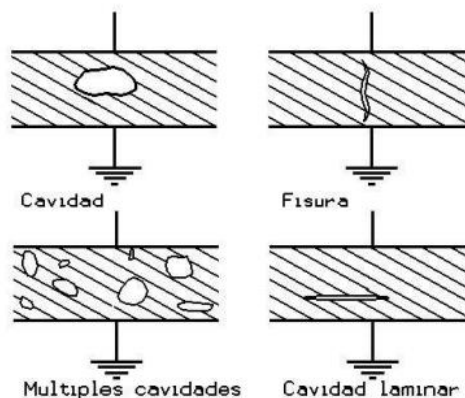


Fig. 6. Cavidades en sistemas de aislamiento sólidos [Martínez Tarifa, 2013].

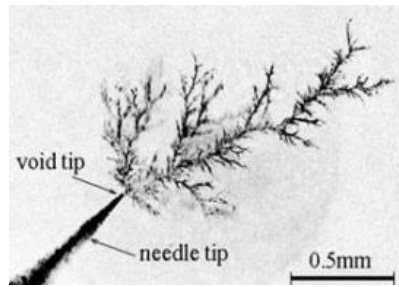


Fig. 7. *Ejemplo de arborescencia* [Wu; Suzuoki.; Mizutani; Xie, 2000].

En la siguiente figura se puede apreciar esquemáticamente una descarga parcial interna.

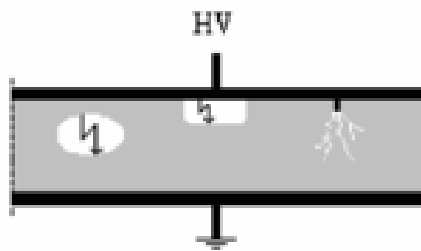


Fig. 8. *Esquema de descarga parcial interna* [Phung, 1997].

- ***Descarga parcial superficial.***

Esta descarga se produce en la superficie de contacto entre dos materiales diferentes, de ahí su nombre, ver Fig. 9. La diferencia entre permitividades ocasiona el aumento del campo en el aire lo que puede ocasionar una ruptura. Las descargas parciales superficiales pueden ocurrir por el resultado de una mala ubicación o instalación del dieléctrico respecto a los conductores o de una corriente de fuga que fluye a través de una capa conductora debido a contaminación o humedad en la superficie de aislamiento.

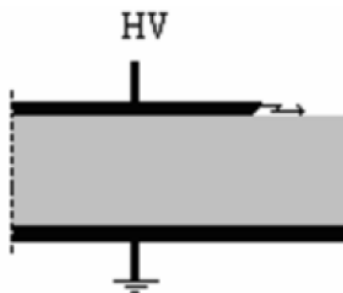


Fig. 9. *Esquema de descarga parcial superficial* [Phung, 1997].

- ***Descarga parcial corona.***

La descarga parcial corona se produce con la ionización del aire alojado entre dos electrodos, ver Fig. 10. Se producen principalmente en elementos con una geometría punta-gas-plano aunque también se puede producir en una geometría punta-gas-punta. Es frecuente que estas descargas vengán acompañadas de interferencias que pueden llegar a producir ruido e incluso luz en algún caso.

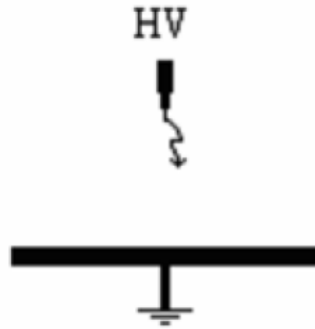


Fig. 10. *Esquema de descarga parcial corona* [Phung, 1997].

2.2. Métodos de detección.

Los métodos de detección de descargas parciales se suelen dividir en dos grupos: no eléctricos y eléctricos.

Métodos no eléctricos.

Existen tres posibles técnicas: acústica, visual u óptica y química.

Detección acústica.

La medición de las descargas parciales mediante métodos acústicos, se basan en la detección de ondas ultrasónicas producidas por descarga parcial a causa de la presión ejercida por la misma en el punto donde se produce.

Este método utiliza una serie de sensores, los cuales pueden ser piezo-eléctricos, opto-acústicos, condensadores microfónicos, acelerómetros y de resonancia. Se trata de sensores a los cuales el ruido eléctrico no les afecta y que

trabajan en un rango de frecuencias que abarca de 10kHz a 300kHz y un rango de temperaturas de -40° a 75°.

Detección visual u óptica.

Se llevan a cabo en una sala oscura, y una vez los ojos se hayan adaptado a la falta de luz. Si es necesario, se pueden usar prismáticos de gran apertura. También es posible realizar un registro fotográfico pero es necesario un gran tiempo de exposición. En este método se busca la luz emitida por las descargas parciales y su localización dentro del dieléctrico.

Detección química.

La presencia de descargas parciales en aparatos aislados en aceite o gases puede ser analizada a través de los productos de descomposición presentes en el aceite o gas.

Métodos eléctricos.

Estos métodos ofrecen la posibilidad de obtener medidas cuantitativas para la realización del estudio de descargas parciales [UNE-EN 60720].

Para detectar las descargas parciales a través de un método eléctrico, se pueden utilizar las técnicas convencionales definidas y regularizadas en el Estándar IEC 60270 u otros métodos no convencionales según el IEC 62478, donde se completa la información con la totalidad de técnicas y sensores no reflejados en el anterior.

Métodos de detección convencionales.

Para obtener la información en los pulsos de descarga de corta duración es necesario partir de la integral de corriente. El valor de esa integral se llama *carga aparente* y la definición dada por la UNE-EN 60270 dice:

“La carga, que inyectada en un intervalo de tiempo muy corto entre los terminales del objeto de ensayo en un circuito específico de

prueba, dará la misma lectura en el instrumento de medida que el pulso de corriente de la DP por sí mismo”.

La normativa habla de la imposibilidad de las medidas de descarga parciales directamente en el punto de descargas, de ahí la necesidad de la carga aparente. Dentro de la normativa, se encuentran dos configuraciones básicas: directa e indirecta que se diferencian en la colocación del objeto de ensayo respecto a la impedancia de medida. En cualquier caso, ambas configuraciones disponen de los mismos elementos:

- Una fuente de alta tensión.
- Una impedancia Z que reduce las perturbaciones de la fuente e impide que los pulsos de las descargas parciales pasen a la misma.
- Un condensador de acoplamiento C_k que posibilitará el paso de pulsos de corriente de alta frecuencia.
- El objeto de ensayo C_a , que se asemejara a una capacidad.
- Una impedancia de medida por la cual va a fluir el pulso de la descarga, Z_{mi} .
- Un dispositivo de acondicionamiento, CD (Conditioned Device).
- Un cable de conexión, CC.
- Un instrumento de medida, MI.

El objeto de ensayo en configuración directa está colocado en serie con la impedancia de medida y el Condensador de acoplamiento lo está en paralelo. En el caso de una configuración indirecta, el objeto de ensayo se intercambiaría con el Condensador de acoplamiento. Ver Fig. 11 y Fig. 12.

La diferencia entre cada una de las dos disposiciones radica en la polaridad (además de la colocación del objeto) que se recibe de la descarga parcial. Si la configuración es directa, la polaridad será idéntica a la tensión aplicada. En caso de una configuración indirecta, la polaridad será la inversa.

Aunque la normativa permite trabajar tanto con la configuración directa como con la indirecta, es utilizada más esta última, debido a que no está el objeto en serie con la impedancia de medida, y así, un posible fallo en el aislamiento del objeto no pondría en riesgo los equipos de medida [UNE-EN 60270].

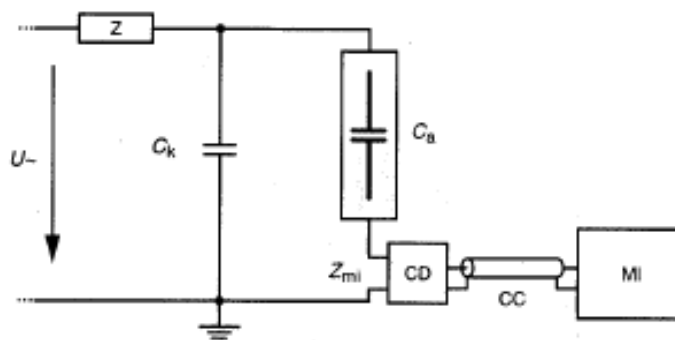


Fig. 11. *Método directo* [UNE-EN 60270].

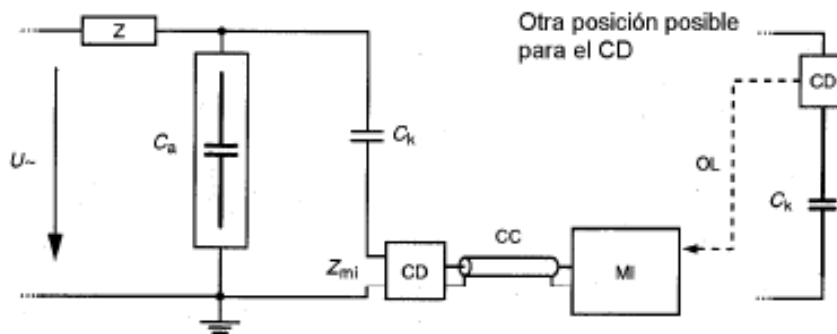


Fig. 12. *Método indirecto* [UNE-EN 60270].

Métodos de detección no convencionales.

Los métodos no convencionales se basan en el estudio de la forma de pulso de una descarga parcial en el tiempo. Existen en tres rangos de frecuencia: *HF* (High Frequency) o Alta Frecuencia en español, *VHF* (Very High Frequency) o Muy Alta Frecuencia y *UHF* (Ultra High Frequency) o Ultra Alta Frecuencia. Con rangos comprendidos entre los 3 MHz y los 300 MHz para los dos primeros, de los que se mide la energía eléctrica, la magnética y la electromagnética, y entre los 300 MHz y 3 GHz para el último, en cuyo rango cual se mide únicamente la energía electromagnética.

La forma de obtención de datos es a través de sensores, distinguiendo que en el rango de frecuencia de HF y VHF trabajan los sensores capacitivos, inductivos y electromagnéticos, como por ejemplo transformadores de corriente, bobina de Rogowski, acoplador direccional, sonda de tensiones transitorias a tierra (TEV), entre otras. Mientras que en el rango correspondiente a UHF trabajan sensores tipo antena, como por ejemplo sensores disco/cono para subestaciones

encapsuladas, sensores de barrera, electrodo de clasificación de campo, antenas UHF, entre otros [IEC 62478].

La utilización de uno u otro, depende de varios factores que influyen en las mediciones, como puede ser el tipo de material, las proporciones geométricas del mismo, la reflexión, la refracción y la forma de descarga. Por norma general, este tipo de métodos no tienen por qué seguir un circuito normalizado como ocurre con los métodos convencionales [UNE-EN 60720].

3. Análisis de DP en continua.

3.1. Introducción.

Cuando se habla de estudios, artículos o ensayos relacionados con las descargas parciales, se asume que se trata de las descargas parciales en corriente alterna. Esto es debido a que la gran mayoría de los mismos están orientados a sus aplicaciones, sobre todo en el campo del suministro de energía.

En el presente trabajo, el estudio de las descargas parciales en corriente continua se basa en la comparación, por lo que, partiendo de las descargas en corriente alterna, se hace una analogía. Es por tanto necesario hablar de las primeras clasificaciones y análisis planteados de descargas parciales en corriente alterna según lo consultado.

En 1993 Kreuger, Gulski y Krivda plantearon en su artículo, “*Classification of partial discharges*”, la clasificación de las descargas parciales en corriente alterna a partir dos posibilidades de reconocimiento:

- A partir del **reconocimiento de la fase relativa** de la cual deriva la Phase Related of Partial Discharge o PRPD.
- A partir del **reconocimiento a tiempo resuelto**, es decir a partir de la forma del pulso de la descarga parcial.

Un año después, en 1994, se presenta una nueva alternativa en el campo de las descargas en corriente alterna. Se cambia el enfoque centrándose en la interacción de las descargas consecutivas con el medio, esta alternativa se rige por la iteración entre descargas consecutivas y se llama **secuencia de pulsos** (Pulse Sequence Analysis o PSA) [Hoof; Patsch, 1994].

Según lo consultado, la primera incursión en descargas parciales en corriente continua, fue realizada conjuntamente por E. C. Rogers y D. J. Skipper y publicado bajo el título “*Gaseous discharge phenomena in high-voltage d.c. cable dielectrics*” en 1960. Sin embargo el artículo se centra en registro de descargas a través de una tasa de repeticiones, y no en el estudio de las magnitudes de las descargas parciales necesario para la clasificación.

Años más tarde, en 1995, Udo Fromm, basándose en la tesis doctoral de Peter Morshuis [Morshuis, 1993], inicia el primer estudio clasificatorio de las descargas parciales en corriente continua a través de la **resolución temporal** (Time Resolution of Partial Discharges o TRPD), el cual se basa en el análisis teniendo en cuenta el tiempo transcurrido entre cada descarga y siendo el esquema de representación análogo al de fase relativa en corriente alterna [Moshuis, Smit, 2005]. Con posterioridad, en 2014 Josef Pihera, Rainer Haller y Petr Mráz, iniciarían el camino del estudio de las descargas parciales en corriente continua a través de la secuencia de los pulsos (PSA).

3.2. Comparación de descargas parciales.

La comparación de las descargas que seguirá este trabajo será en primer término respecto a la representación de la fase relativa y la resolución temporal, con su posterior estudio estadístico y finalizar con otras alternativas.

3.2.1. Comparación de representación.

Cuando se habla de fase relativa (PRPD) se relaciona una magnitud de descarga, qi (medida en picoculombios) y el ángulo de fase de ciclo de tensión.

El ángulo de fase se calcula de la siguiente manera:

$$(1) \phi_i = 360(t_i/T)$$

Siendo t_i el tiempo medido entre el paso por cero previo del frente creciente de la tensión de ensayo y el pulso de descarga parcial. T corresponde al periodo de la tensión. Este ángulo se expresa en grados ($^\circ$).

La representación de la fase relativa a su vez se presenta de dos posibles maneras: representación en elipse y representación en onda sinusoidal, siendo esta última la más usada.

- En la representación en elipse, los extremos del eje mayor corresponden a los pasos por cero de la onda sinusoidal mientras que los extremos del eje menor corresponden a los máximos de magnitud de la misma, es decir (90° y 270°). Por convenio se establece que la parte superior de la elipse corresponde a los valores de onda positivos. La lectura se realiza acorde a las agujas del reloj.

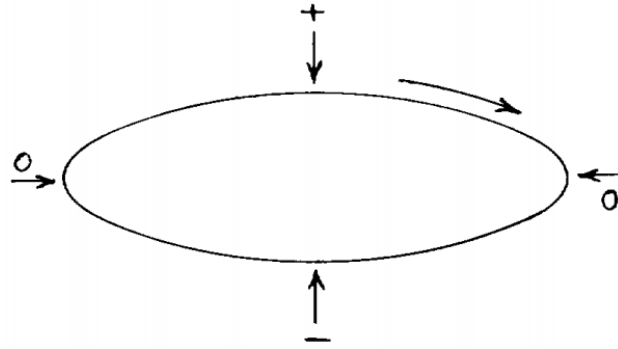


Fig. 13. Representación en elipse [Cigre, 1969].

- En la representación en forma sinusoidal, como su propio nombre indica, se refleja a partir de la onda sinusoidal de la tensión, de esta manera los valores de ángulo de fase corresponden a los mismos valores que en la onda.

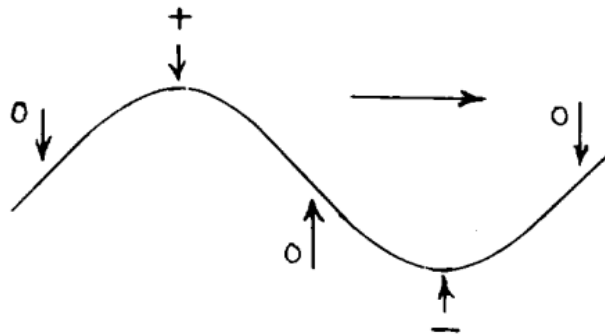


Fig. 14. Representación onda sinusoidal [Cigre, 1969].

Por otra parte, en corriente continua en el estudio de Udo Fromm y su tesis doctoral "*Partial Discharge and Breakdown Testing at High dc Voltage*" se opta por la representación por tiempo de resolución (TRPD). Esta representación se realiza a partir de la magnitud de descarga, q_i , medida en picoculombios y por el tiempo transcurrido entre cada descarga parcial, Δt_i , como se aprecia en la Fig. 15.

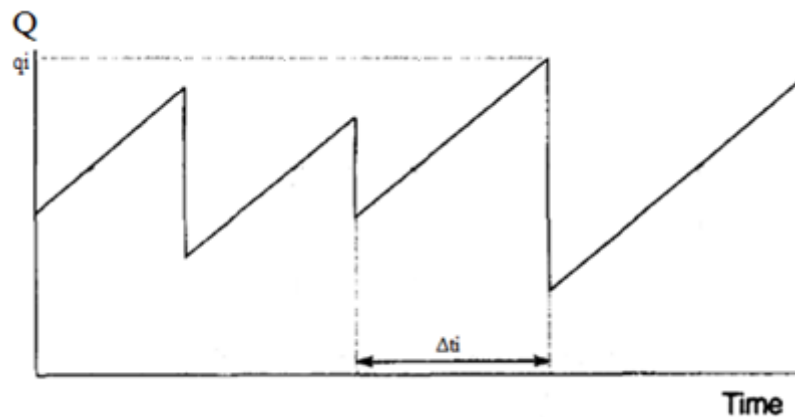


Fig. 15. Descargas parciales consecutivas en corriente continua [Fromm, 1995].

Así una comparación de los esquemas de descargas parciales en corriente alterna y corriente continua sería el de la Fig. 16. los cuales presentan una analogía.

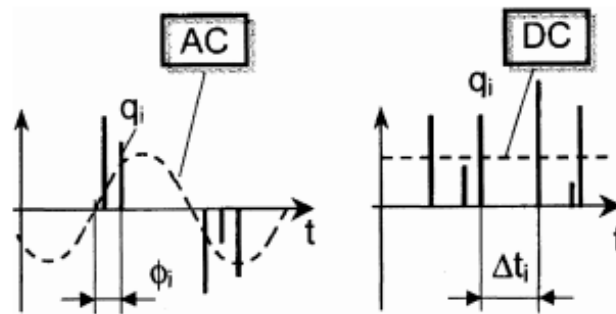


Fig. 16. Comparación entre esquemas de PRPD y TRPD [Moshius, Smit, 2005].

Cada descarga parcial tiene un único patrón PRPD si se trabaja en corriente alterna o TRPD si lo hacemos en continua, es por ello que se ha procedido a hacer una comparación según la naturaleza de la descarga parcial [Beyer, 2002].

Descargas parciales internas.

La distribución de descargas parciales en caso de trabajar en corriente alterna se aloja principalmente en el frente creciente del semiciclo positivo y en el frente menguante del semiciclo negativo, se observa cierta simetría como se puede ver en Fig.17. [Martínez Tarifa, 2013]. Por otro lado, al trabajar en corriente continua se observa una concentración de magnitudes muy bajas como se aprecia en la Fig. 18 [Beyer, 2002].

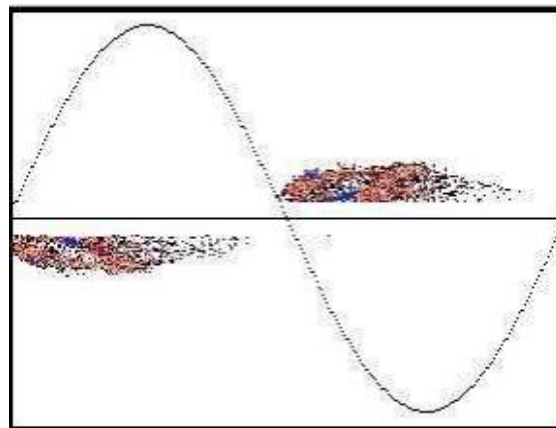


Fig. 17. Representación de patrón de una descarga parcial interna en CA [Martínez Tarifa, 2013].

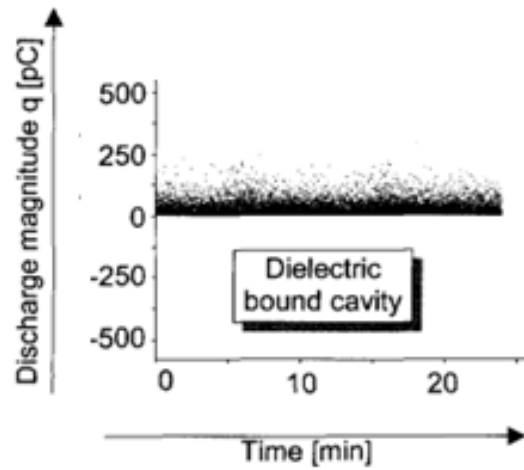


Fig. 18. Representación de patrón de una descarga parcial interna en CC [Beyer, 2002].

Descargas parciales superficiales.

Hablando en corriente alterna, el patrón presenta cierta similitud a la descarga parcial interna, pero con un patrón más asimétrico y presentando valores de magnitud más dispersos como se aprecia en Fig. 19 [Martínez Tarifa, 2013]. En el caso de corriente continua, presenta una gran fluctuación tanto en el tiempo como en los valores de magnitud de descargas como se aprecia en la Fig. 20 [Beyer, 2002].

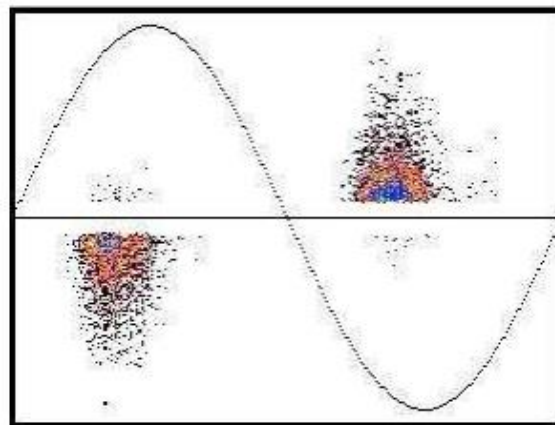


Fig. 19. Representación de patrón de una descarga parcial superficial en CA [Martínez Tarifa, 2013].

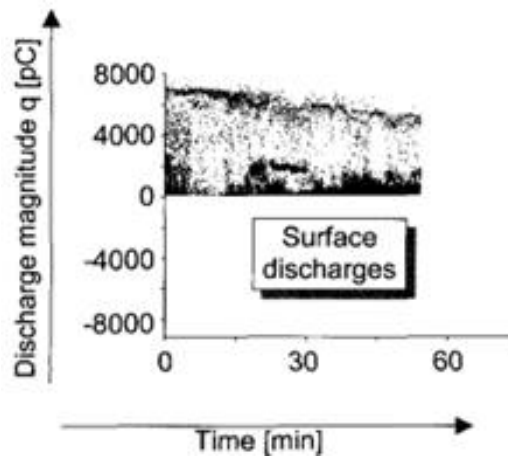


Fig. 20. Representación de patrón de una descarga parcial superficial en CC [Beyer, 2002].

Descargas parciales en corona.

El patrón de las descargas parciales en corona se concentra mayoritariamente en el semiciclo negativo. Cuando se aplica la tensión en la punta, esta produce una alta divergencia de campo eléctrico resultante, lo que provoca una ruptura del gas alojado entre la punta y el plano. Tienen un valor prácticamente constante, ver Fig. 21 [Martínez Tarifa, 2013]. Cabe destacar que, aplicando una gran tensión es posible apreciar actividad en el semiciclo positivo, esto es debido a que la tensión de ignición es diferente según la polaridad, siendo en polaridad positiva mayor. Por otra parte, en el caso de corriente continua, el patrón que presenta es una banda estrecha a una cierta magnitud de descarga y en un tiempo menor que las anteriores, como se observa en la Fig. 22 [Beyer, 2002].

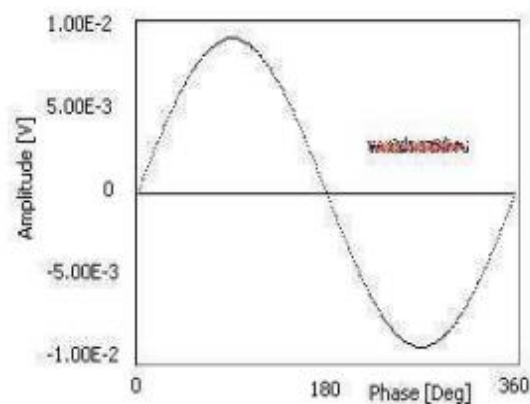


Fig. 21. Representación de patrón de una descarga parcial corona en CA [Martínez Tarifa, 2013].

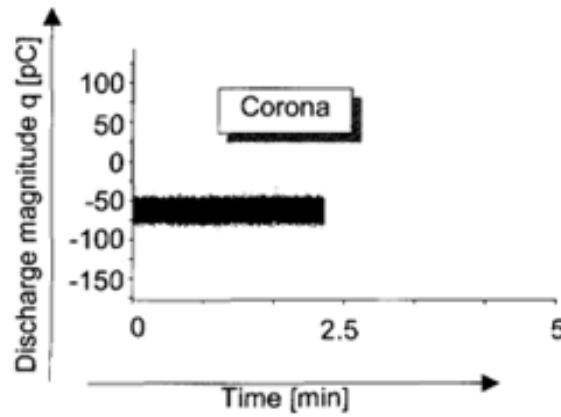


Fig. 22. Representación de patrón de una descarga parcial corona en CC [Beyer, 2002].

3.2.2 Estudio estadístico.

A partir de los patrones de PRPD y los patrones de TRPD, considerando la estocasticidad de las descargas, se llega a un análisis estadístico basado en la magnitud de la descarga (q) y en el ángulo de fase (ϕ) al trabajar con patrones PRPD o el tiempo entre descarga (Δt) al hacerlo con patrones TRPD, por generalización se procede a sustituir por una misma variable “a” ambos parámetros, como se refleja en la tabla 1.

Variable	PRPD	TRPD
a	Φ	Δt

Tabla 1. Asignación de la variable “a” respecto a los parámetros de PRPD y TRPD

[elaboración propia].

1. La distribución de probabilidad $H_{q_{\max}}$ (a) muestra el valor máximo del pulso (pC) producido en cada ángulo de fase o tiempo entre descarga.
2. La distribución de probabilidad H_{qn} (a) muestra el valor medio de la magnitud de los pulsos (pC) producidos en cada ángulo de fase o tiempo entre descarga.
3. La distribución de probabilidad H_n (a) muestra el número de descargas producidas en cada ángulo de fase o tiempo entre descarga.

En el caso de las descargas parciales en corriente alterna, como se ha observado, no tienen por qué ser iguales los patrones en el semiciclo positivo y en el semiciclo negativo del ciclo de la tensión. Por tanto, las anteriores distribuciones se dividirán en dos respectivamente, dando como resultado: $H_{q_{\max}}^+(\phi)$, $H_{qn}^+(\phi)$, $H_n^+(\phi)$ y $H_{q_{\max}}^-(\phi)$, $H_{qn}^-(\phi)$, $H_n^-(\phi)$.

En corriente continua, el parámetro Δt puede ser calculado con dos valores, el tiempo previo o el sucesivo. Es por ello que se opta por asignar a los valores de tiempos previos análogos al semiciclo positivo y los tiempos sucesivos análogos al semiciclo negativo, ver Fig. 23. Donde se observan las distribuciones para cada uno de las descargas parciales. Quedando por tanto las distribuciones divididas en $H_{qmax}^+(\Delta t_{pre})$, $H_{qn}^+(\Delta t_{pre})$, $H_n^+(\Delta t_{pre})$ y $H_{qmax}^-(\Delta t_{suc})$, $H_{qn}^-(\Delta t_{suc})$, $H_n^-(\Delta t_{suc})$. Esto se hace con el fin de poder obtener la totalidad de los parámetros estadísticos expuestos a continuación [Beyer, 2002].

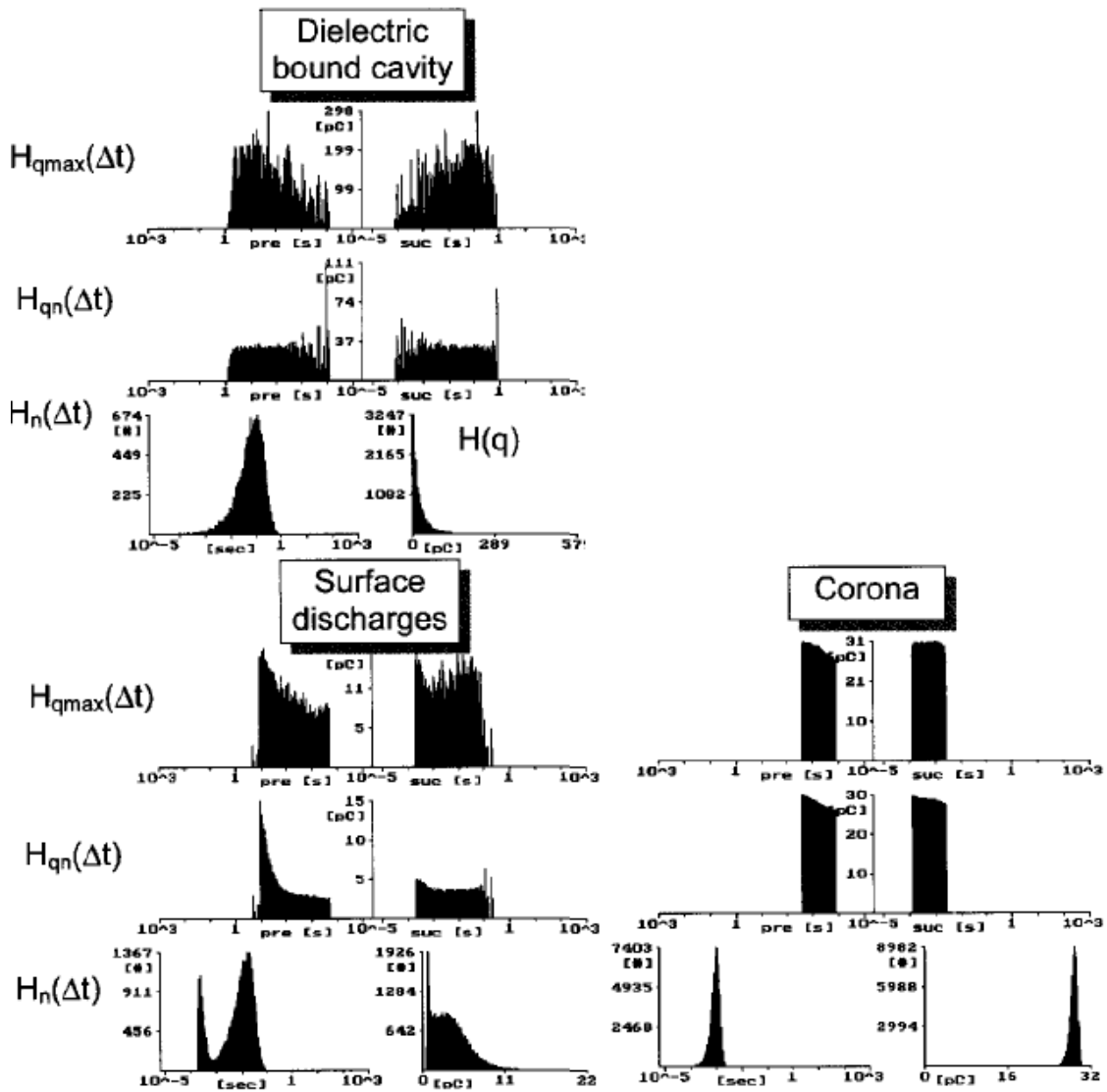


Fig. 23. Ejemplo de distribuciones estadísticas para diferentes defectos de descarga parcial en corriente continua [Beyer, 2002].

Una vez caracterizadas las descargas por medio de sus distribuciones, es necesario obtener los parámetros estadísticos relevantes para así definir las distribuciones:

- **Skewness (S_k) o Sesgo:** Describe la asimetría de la distribución con respecto a una normal. Se define como:

$$(2) S_k = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 \cdot P_i}{\sigma^3}$$

Donde x_i es el valor del dato, P_i es la probabilidad de que aparezca dicho valor x_i en un ángulo determinado (o tiempo sucesivo), μ es la media ($\mu = \sum x_i \cdot P_i$) y σ es la varianza. ($\sigma^2 = \sum (x_i - \mu)^2 \cdot P_i$)

Así, si $S_k=0$ es simétrica, si $S_k<0$ es asimétrica a la derecha y si $S_k>0$ es asimétrica a la izquierda, ver Fig. 24 [Kreuger; Gulski; Krivda, 1993].

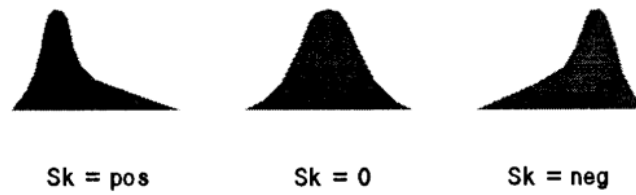


Fig. 24. Posibles sesgos [Kreuger; Gulski; Krivda, 1993].

- **Kurtosis (K_u) o Curtosis:** Representa lo escarpado de la distribución con respecto a una normal. Se define como:

$$(3) K_u = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 \cdot P_i}{\sigma^4} - 3$$

Si la distribución es similar a una normal $K_u=0$, si es más abrupta $K_u>0$, y si es más llana $K_u<0$, ver Fig. 25 [Kreuger; Gulski; Krivda, 1993].

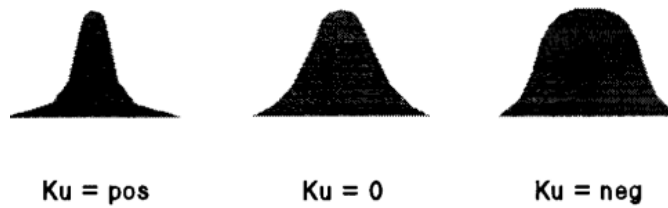


Fig. 25. Posibles curtosis [Kreuger; Gulski; Krivda, 1993].

- **Número de picos (P_e)** Distingue entre las distribuciones de un solo pico o con varios. El pico de una distribución se obtiene si:

$$(4) \frac{dy_{i-1}}{dx_{i-1}} > 0 ; (5) \frac{dy_{i+1}}{dx_{i+1}} < 0$$

Siendo $\frac{dy_{i-1}}{dx_{i-1}}$ un coeficiente diferencial entre una amplitud (y) y un tiempo (x) anteriores a un posible pico y $\frac{dy_{i+1}}{dx_{i+1}}$ un coeficiente diferencial posterior a un posible pico [Kreuger; Galski; Krivda, 1993].

- **Factor de correlación cruzado (cc).** Muestra la diferencia de forma entre las distribuciones del semiciclo positivo y negativo $H_{qmax}^+(a)$, $H_{qn}^+(a)$, $H_n^+(a)$ y $H_{qmax}^-(a)$, $H_{qn}^-(a)$, $H_n^-(a)$.

$$(6) \text{ } cc = \frac{\sum X_i \cdot Y_i - \sum X_i \cdot \sum Y_i / n}{\sqrt{[\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2 / n][\sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2 / n]}}$$

Donde X_i es el valor de la descarga en el semiciclo positivo e Y_i en el negativo (apareciendo ambos en el mismo ángulo), teniendo en cuenta que 180° es el inicio del periodo negativo, y siendo n la resolución de fase en cada semiciclo.

Un valor de $cc=1$ indica que los 2 semiciclos tienen la misma distribución y $cc=0$ indica que ambas son totalmente asimétricas [Kreuger; Galski; Krivda, 1993].

- **Asimetría.** Es el cociente del nivel medio del semiciclo negativo y del positivo de las distribuciones $H_{qmax}(a)$, $H_{qn}(a)$, $H_n(a)$.

$$(7) \text{ } Asimetría = \frac{Q_s^- / N^-}{Q_s^+ / N^+} \text{ ó } \frac{Q_s^{\Delta tpre} / Npre}{Q_s^{\Delta tsuc} / Nsuc}$$

Donde Q_s es el valor medio de magnitudes de cada semiciclo y N es el número de descargas producido en dicho periodo. Los valores de la asimetría varían entre -1 y 1, indicando que a valores negativos, la distribución se encuentra en el semiciclo positivo; en caso de valores positivos en el semiciclo negativo; y en el caso de 0 existe equidad en la distribución tanto en el semiciclo positivo como en el semiciclo negativo [Kridva, 1995].

- **Factor de fase.** Se utiliza para estudiar la diferencia entre el principio de cada semiciclo de la distribución en cuestión. Se define como:

$$(8) \text{ } Factor \text{ de fase} = \frac{\phi_{inc}^-}{\phi_{inc}^+}$$

Donde ϕ_{inc}^+ es el inicio de fase en el semiciclo positivo y ϕ_{inc}^- el inicio en el semiciclo negativo. Este parámetro estadístico es único de descargas parciales en corriente alterna ya que se mira el efecto de la polaridad de la tensión, y en el caso de CC no existe [Krivda, 1995].

Con estos seis parámetros se puede describir perfectamente todas las distribuciones de las descargas parciales mediante un formato llamado “huella dactilar” (fingerprint) de las descargas parciales producidas [Krivda, 1995] [Beyer, 2002], las cuales vienen representadas tanto para corriente alterna (Fig. 26) como para corriente continua (Fig. 27).

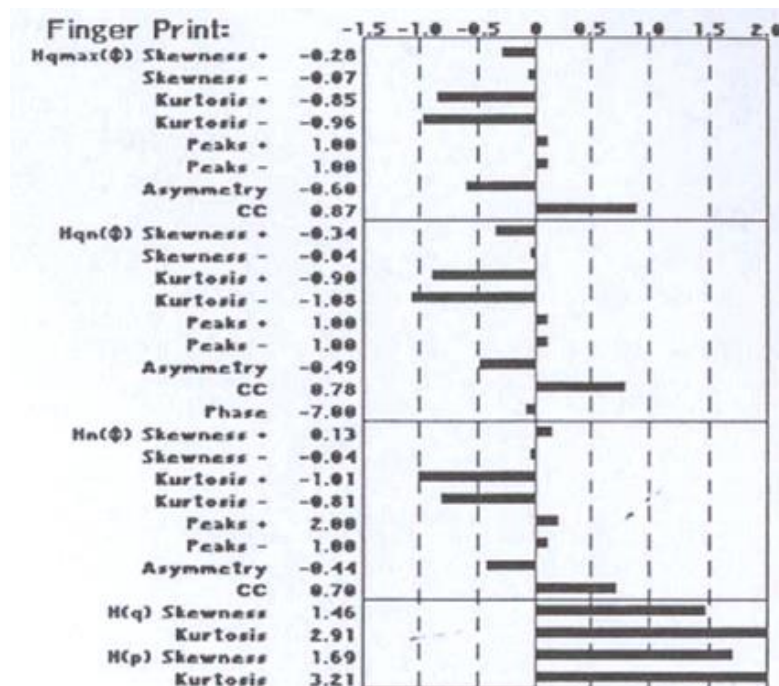


Fig. 26. Ejemplo de huella dactilar para corriente alterna [Krivda, 1995].

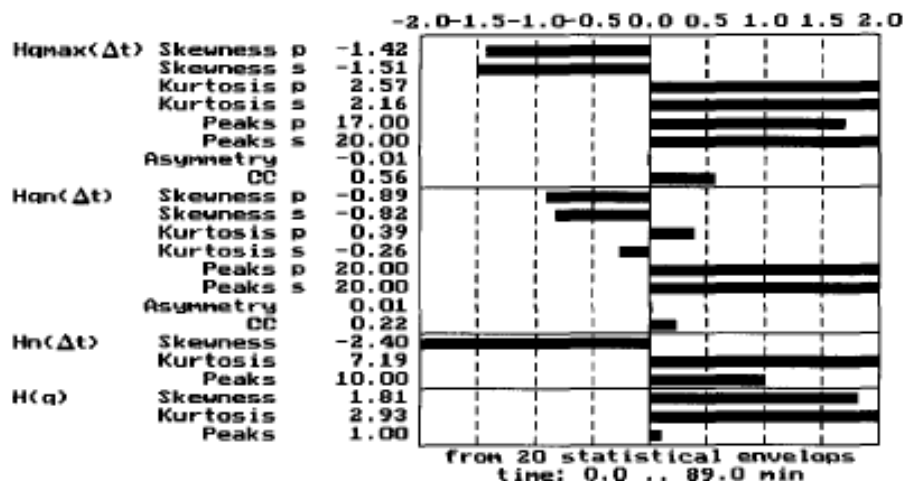


Fig. 27. Ejemplo de huella dactilar para corriente continua [Beyer, 2002].

Una vez visto el estudio estadístico, se podría realizar un histograma de densidad de probabilidad, obteniendo el siguiente conjunto de gráficos representados en la Fig. 28. Estos histogramas de densidad son de descargas parciales en corriente continua debido a la búsqueda de conclusiones.

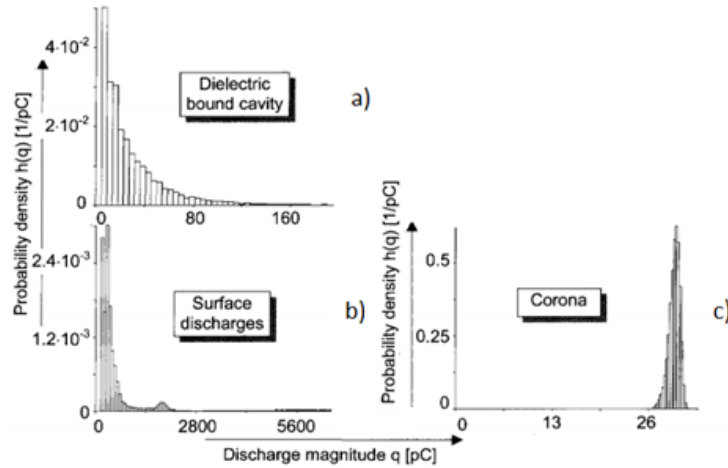


Fig. 28. Conjunto de histogramas de densidad de probabilidad de descargas parciales para CC [Beyer, 2002].

Analizándose acorde al orden anteriormente establecido, se ve en la Fig. 28. a) la descarga interna, observando su máxima probabilidad en valores bajos de magnitud de descarga y presentando un decrecimiento exponencial. En Fig. 28. b) se observan las descargas superficiales y se percibe una gráfica muy parecida a la interna, con un decrecimiento también exponencial con la salvedad de la existencia de un máximo local. Y en último lugar, Fig. 28. c) la descarga en corona, la cual está concentrada en un rango de magnitudes muy pequeño [Beyer, 2002].

Es posible la obtención de histogramas tridimensionales, en los cuales dependerán tanto del valor de pulso como del tiempo entre sucesivos $H_n(q, \Delta t_{suc})$. El hecho de trabajar con Δt_{suc} en lugar de hacerlo con Δt_{pre} , se debe a que no existe una gran diferencia entre uno y otro, como se aprecia en la Fig. 29. el histograma dispondrá de eje de densidad de probabilidad, el cual es adimensional, magnitud de descarga, medida en pC (o nC) y tiempo medio entre descargas en potencias de 10, iniciándose en 10^{-5} para acabar en 10^3 medido en segundos.

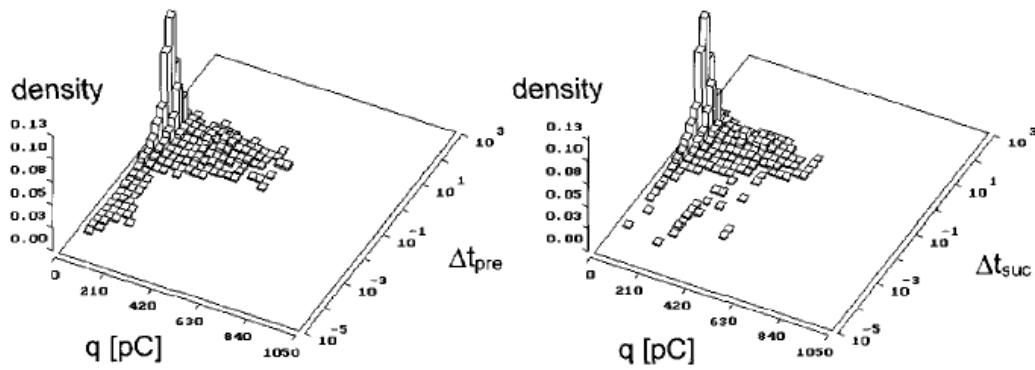


Fig.29. Histogramas tridimensional $H_n(q, \Delta t_{pre})$ y $H_n(q, \Delta t_{suc})$ para CC [Beyer, 2002].

Así unos ejemplos de histogramas tridimensionales en corriente continua serían los que prosiguen. En primer lugar, la Fig. 30 para una descarga parcial interna en la que se aprecia un máximo de densidad a valores pequeños de magnitud de descarga y con un valor de 0,1 segundos principalmente como el tiempo medio entre descargas. En segundo lugar, la Fig. 31 para una descarga parcial superficial en la cual se distingue una gran fluctuación en los valores de magnitud de descarga y valores de densidad ligeramente superiores en rangos de magnitud pequeños, está muy localizado entre los valores de tiempo medio de 1 segundo y los 100 segundos y por último, la Fig. 32, el cual está muy concentrado en una pequeña región en torno a los 43 pC de magnitud y los 0,01 segundos de tiempo medio entre descargas, con un máximo de densidad muy superior a los anteriores [Fromm, 1995].

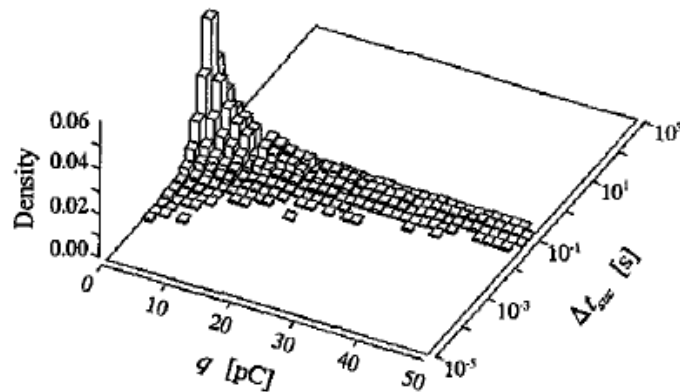


Fig. 30. Histograma tridimensional de descarga parcial interna en CC [Fromm, 1995].

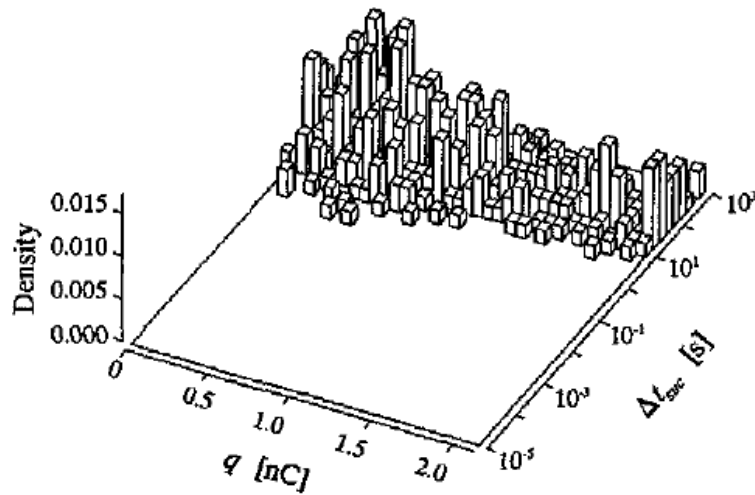


Fig. 31. Histograma tridimensional de descarga parcial superficial en CC [Fromm, 1995].

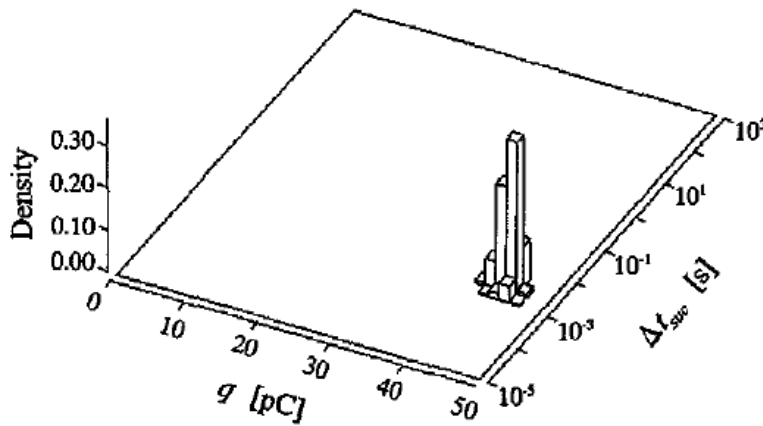


Fig. 32. Histograma tridimensional de descarga parcial corona en CC [Fromm, 1995].

3.2.3 Otras alternativas.

Una vez vista la comparación entre los métodos de fase relativa de descargas parciales (PRPD) y resolución temporal de descargas parciales (TRPD), aparece otra alternativa que surge con la premisa en la que, al ocurrir una descarga parcial en el aislamiento, esta produce cambios en la distribución original del experimento, véase un cambio en el tamaño de vacuolas o el campo eléctrico cambia en los alrededores lo que a su vez influye en las descargas parciales posteriores. Es por tanto necesario un nuevo método de análisis, llamado análisis de secuencia de pulsos (PSA) como la solución ante estos cambios, pues al realizarse a partir de operaciones con pulsos consecutivos los cambios producidos están incluidos en los valores de análisis.

Así en 1994, M. Hoof y R. Patsch, en su conferencia titulada “*Analyzing Partial Discharge Pulse Sequences - A New Approach to Investigate Degradation Phenomena*” inician este método para las descargas parciales en corriente alterna. En este método, la clasificación no depende del ángulo de fase en la descarga parcial. Se utilizan el valor de tiempo correspondiente al transcurrido entre dos descargas consecutivas y a la comparación de magnitudes de tensión instantáneas en los puntos en los que ocurren descargas consecutivas, realizándose posteriormente una iteración cada una con su correspondiente sucesivo. Para una mayor facilidad de comprensión se procede a definir los ejes de la gráfica de trabajo, con ayuda de la Fig.33, la cual muestra descargas parciales consecutivas con las que sacar los parámetros básicos del método PSA.

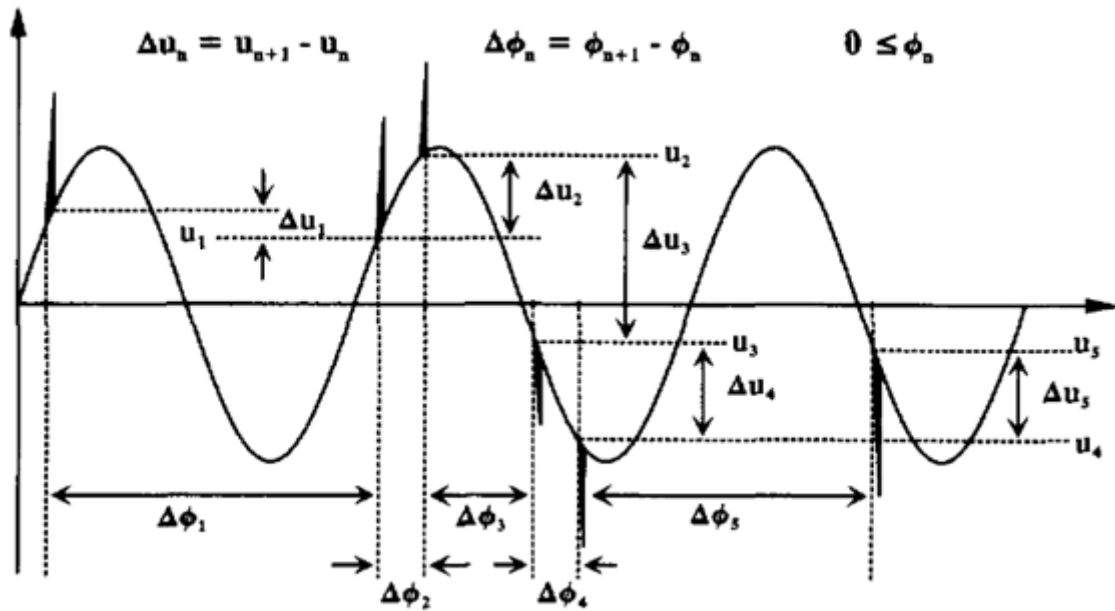


Fig. 33. Parámetros básicos de la estandarización de PSA [Hoof; Patsch, 1994].

Así en la Fig. 34 se asigna al eje Y, $\Delta U(n)$, la cual no es más que la iteración de la magnitud del voltaje sucesivo, u_{n+1} , menos la magnitud del voltaje instantáneo u_n y el eje X corresponde, $\Delta U(n-1)$, que es la iteración de la magnitud del voltaje instantáneo u_n menos la magnitud del voltaje previo u_{n-1} , presentadas en la siguientes ecuaciones:

$$(9) \text{ Eje Y: } \Delta U(n) = u_{n+1} - u_n$$

$$(10) \text{ Eje X: } \Delta U(n-1) = u_n - u_{n-1}$$

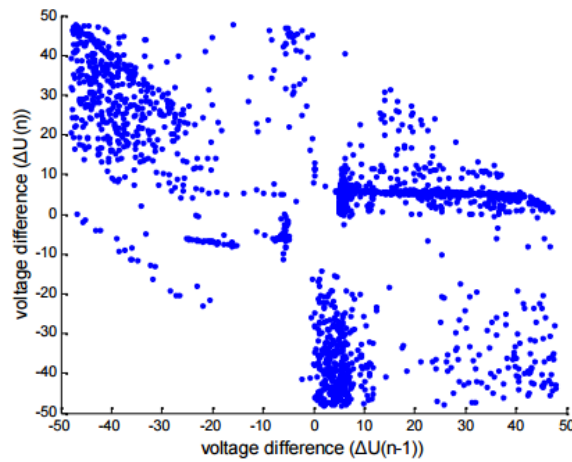


Fig. 34. Ejemplo de patrón de PSA aplicando las iteraciones [Illias; Teo Soon; Bakar; Mokhlis; Chen; Lewin, 2012].

Definidos los ejes por las ecuaciones expuestas anteriormente, se procede al análisis. Se ha optado por iniciar el estudio de PSA en corriente alterna con la conferencia “*Partial Discharge Patterns in High Voltage Insulation*” de Illias, Teo Soon, Bakar, Mokhlis y Chen del año 2012 en la que se procede a realizar un aumento en la tensión aplicada para comprobar si el patrón obtenido es extrapolable indistintamente de la tensión aplicada. En primer lugar se presentan los objetos de ensayo de dicho trabajo, en primer término el de las descargas parcial interna, ver Fig. 35 en la que se observa una vacuola dentro de resina epoxi, en la Fig. 36 el objeto de ensayo de la descarga parcial superficial realizado en un objeto de polietileno reticulado y en último término, la Fig.37 objeto de ensayo para la descarga parcial corona.

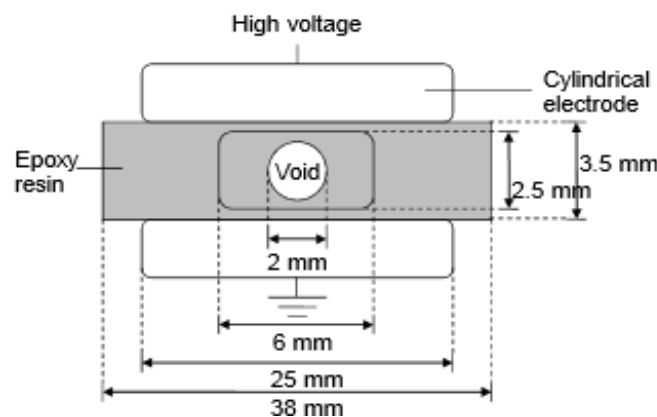


Fig. 35. Objeto de ensayo para descargas parciales internas [Illias et al., 2012].

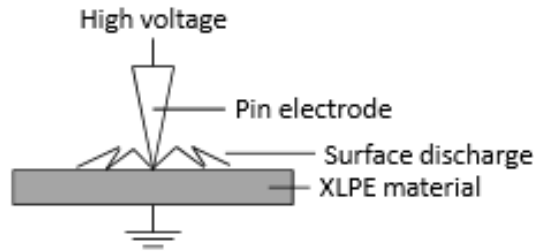


Fig. 36. *Objeto de ensayo para descargas parciales superficiales* [Illias et al., 2012].

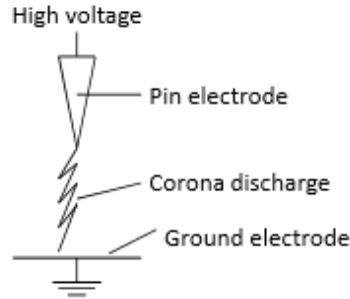


Fig. 37. *Objeto de ensayo para descargas parciales corona* [Illias et al., 2012].

La primera de las descargas a analizar corresponde a la descarga parcial interna, en la cual, los autores realizan dos experimentos aplicando inicialmente 18 kV, ver Fig.38 y aumentando a 24 kV, ver Fig. 39. Se observa en ambos patrones cierta similitud un prisma cuadrangular aunque variando los valores máximos según la tensión aplicada, hecho por el cual, los autores trabajan con kilovoltios tanto en el eje X como en el eje Y [Illias et al., 2012].

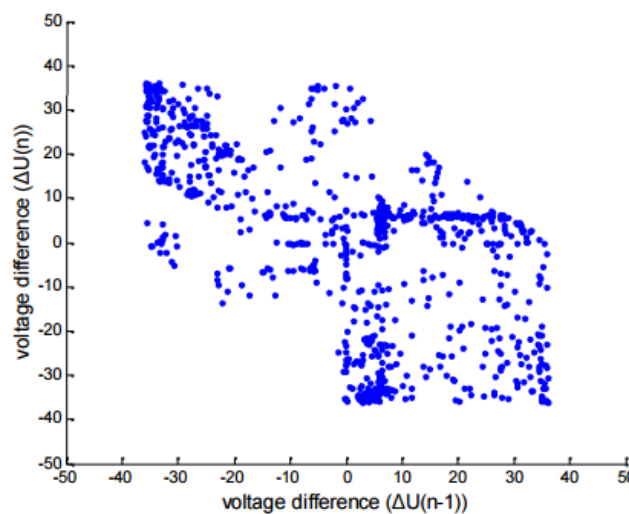


Fig. 38. *Patrón PSA 18kV en descarga parcial interna con CA* [Illias et al., 2012].

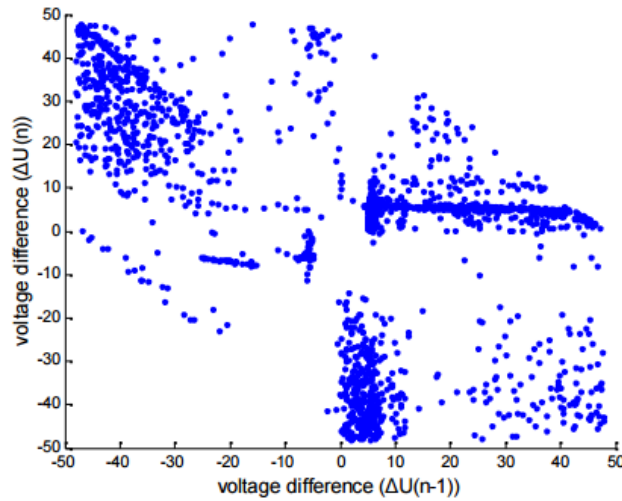


Fig. 39. *Patrón PSA aplicando 24kV en descarga parcial interna con CA* [Illias et al., 2012].

La segunda de las descargas parciales corresponde a las superficiales, en estas la tensión de trabajo la incrementan de 3 kV, ver Fig. 40 a 6 kV ver Fig. 41. De nuevo se observa cierta semejanza a un prisma cuadrangular pero más concentrado en el entorno del origen debido a que la diferencia entre descargas consecutivas es pequeña. El diseño del objeto de ensayo se asemeja al de descarga corona y por tanto las descargas parciales aparecen con mayor frecuencia en la polaridad negativa, haciendo que la aparición de pequeñas regiones en el caso de aplicación de mayor tensión se deba a la ubicación en distintos semiciclos de las descargas consecutivas [Illias et al., 2012].

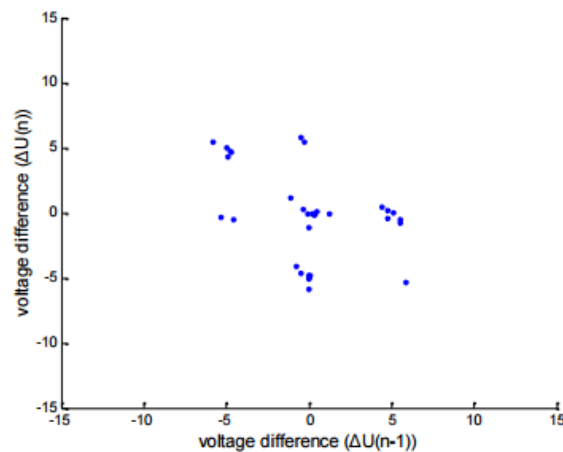


Fig. 40. *Diferencia de tensión aplicando 3kV en descarga parcial superficial* [Illias et al., 2012].

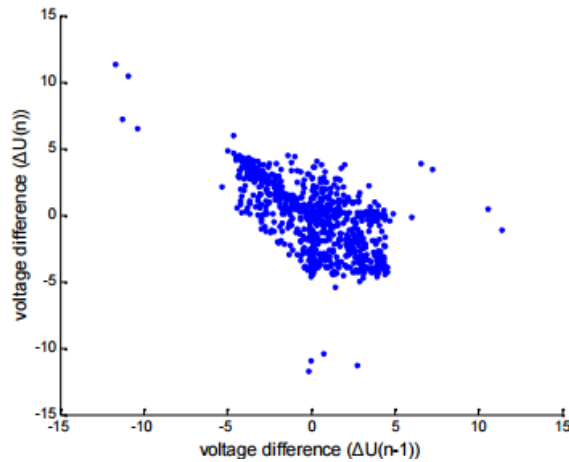


Fig. 41. *Patrón PSA aplicando 6kV en descarga parcial superficial* [Illias et al., 2012].

La última de las descargas, la descarga corona, en la que el primero de los patrones corresponde al realizado a 10 kV, ver Fig. 42 y posteriormente elevado a 14 kV, ver Fig. 43. En ella los autores advierten que la diferencia entre uno y otro se debe a la existencia de descargas parciales en el semiciclo positivo debido al aumento realizado en el segundo análisis. No existe una gran diferencia entre los valores consecutivos, de ahí el grupo central, en las dos regiones en las que uno de los dos ejes es próximo a cero y el otro es grande indica que las descargas consecutivas se han producido en diferente polaridad [Illias et al., 2012].

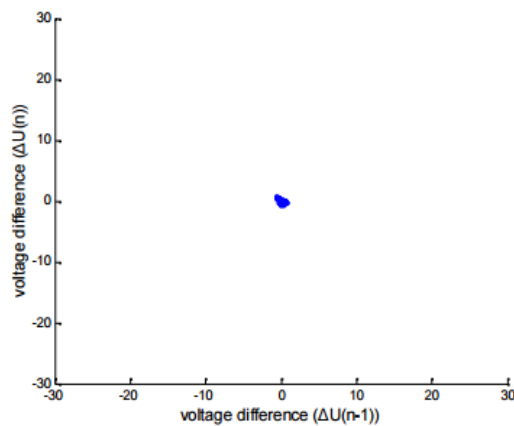


Fig. 42. *Patrón PSA aplicando 10kV en descarga parcial corona* [Illias et al., 2012].

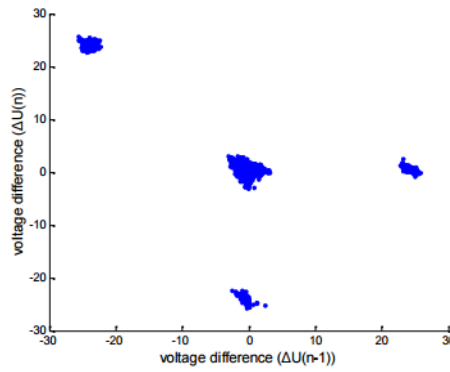


Fig. 43. Patrón PSA aplicando 14kV en descarga parcial corona [Illias et al., 2012].

El inicio de esta línea de estudio en descargas parciales en corriente continua, está fechada, según la bibliografía consultada, a 2014 por los autores Josef Pihera, Rainer Haller y Petr Mráz con su conferencia "*Partial Discharges Evaluation at DC Voltage*", en la que comparan el análisis de pulsos consecutivos, aplicando tanto corriente alterna como continua. Los objetos de ensayo para ambas corrientes son los mismos, por lo que es factible un análisis de los mismos, los autores anteriormente mencionados seleccionaron para sus pruebas de descargas parciales internas en aceite un pequeño trozo de plástico reforzado con vidrio con una vacuola en el centro, ver Fig. 44 y en el caso de trabajar en descarga parcial corona el objeto de la Fig. 45.

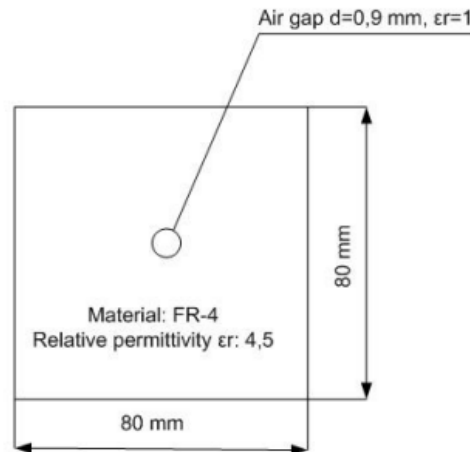


Fig. 44. Esquema de objeto de ensayo para descarga parcial interna en aceite [Pihera, Haller, Mráz, 2014].

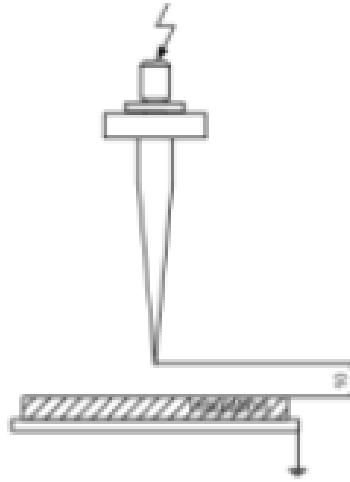


Fig. 45. Esquema de objeto de ensayo para descarga parcial corona [Pihera, Haller, Mráz, 2014].

Para las descargas en corriente continua se aplica otro enfoque debido a que la tensión aplicada es constante. Para hacer factible la comparación entre ambas corrientes, la iteración se realiza con los valores de magnitud de descarga aparente. Pihera, Haller y Mráz plantean unos ejes similares a los de CA, haciendo que el eje Y sea de nuevo la iteración de la diferencia entre $Q_{n+1} - Q_n$ y el eje X sea $Q_n - Q_{n-1}$. Expresadas en las siguientes ecuaciones.

$$(11) \text{ Eje Y: } \Delta Q (n) = q_{n+1} - q_n$$

$$(12) \text{ Eje X: } \Delta Q (n - 1) = q_n - q_{n-1}$$

El orden elegido para representar los patrones de este artículo será comenzar con la descarga parcial interna, primero con las descargas en corriente alterna y luego continua con polaridad positiva y polaridad negativa, para acabar con la descarga parcial en corona haciendo el mismo procedimiento según la naturaleza de la corriente. Debido a que de descarga parcial superficial no viene, ni se ha localizado ningún estudio en corriente continua, no viene incluida.

El primer patrón de PSA es el de la corriente alterna aplicando 10 kV, ver Fig. 46, teniendo posteriormente el patrón aplicando +40 kV en corriente continua, ver Fig. 47 y aplicando -40 kV en corriente continua, ver Fig. 48. Se observa cierta semejanza tanto aplicando corriente continua de polaridad positiva como trabajando con corriente alterna, con la salvedad de que es necesario mayores valores de tensión en CC para obtener los mismos (o muy próximos) resultados que en CA.

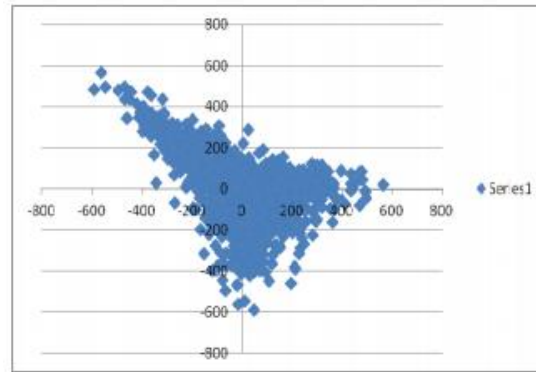


Fig. 46. *Descarga parcial interna en aceite con AC a 10kV* [Pihera, Haller, Mráz, 2014].

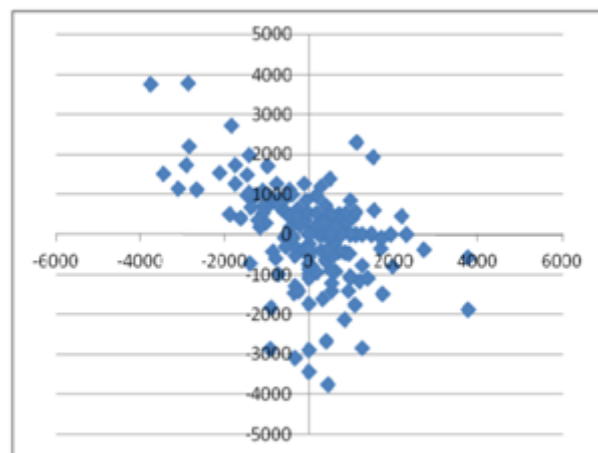


Fig. 47. *Descarga parcial interna en aceite con DC+ a 40kV* [Pihera, Haller, Mráz, 2014].

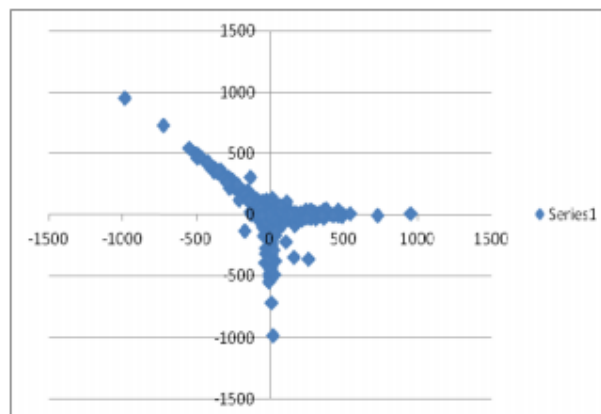


Fig. 48. *Descarga parcial interna en aceite con DC- a 40kV* [Pihera, Haller, Mráz, 2014].

En el caso de descargas parciales corona, los autores realizan el experimento de corriente alterna a 6 kV, ver Fig. 49, lo realizan después con corriente continua aplicando +40 kV obteniendo el patrón de la Fig. 50 y finalizándolo aplicando -40 kV en corriente continua, obteniendo el patrón de la Fig. 51. Observándose nuevamente cierta semejanza

en los resultados aplicando corriente continua de polaridad positiva como trabajando con corriente alterna, y de nuevo es necesario un incremento en la tensión aplicada en CC para asemejarlos a los de CA [Pihera, Haller, Mráz, 2014].

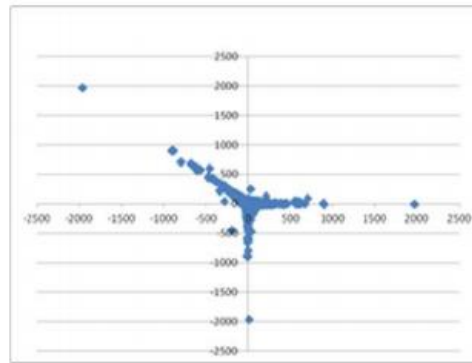


Fig. 49. *Descarga parcial corona con AC a 6kV* [Pihera, Haller, Mráz, 2014].

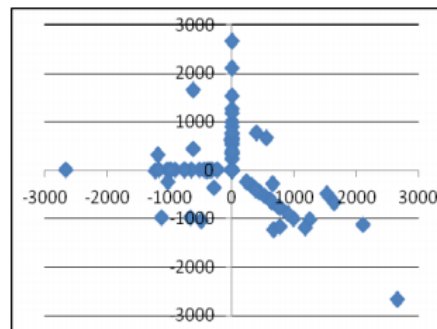


Fig. 50. *Descarga parcial corona en DC+ a 40kV* [Pihera, Haller, Mráz, 2014].

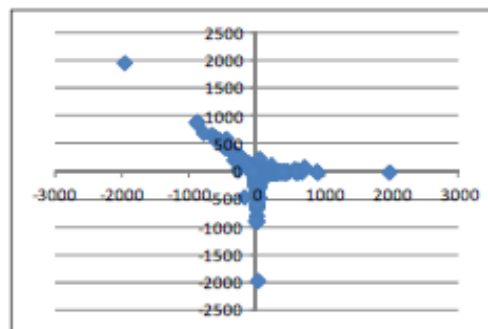


Fig. 51. *Descarga parcial corona en DC- a 40kV* [Pihera, Haller, Mráz, 2014].

Existen otras alternativas en el campo de la secuencia de pulsos, como puede ser el análisis caótico de descargas parciales (Chaotic Analysis of Partial Discharges o CAPD). Este tipo de análisis se inicia con el artículo “*Comparative Analysis of Partial Discharge Patterns from Different Artificial Defects by Means of Conventional Phase-*

Resolved Partial Discharge Analysis and a Novel Chaotic Analysis of Partial Discharge

el cual trabaja con la magnitud de la descarga, p_t , ya sea a través de picoculombios o de voltios, y con el tiempo entre descarga, Δt , representadas en la Fig. 52. Se ha elegido el trabajo “*Identification of Insulation Defects Based on Chaotic Analysis of Partial Discharge in HVDC Superconducting Cable*” de los autores In-Jin Seo, Umer Amir Khan, Jae-Sang Hwang, Jong-Geon Lee y Ja-Yoon Koo, debido a ser el estudio más reciente en este tipo de análisis, además de tratar de descargas parciales en corriente continua. Para realizar este análisis propusieron la normalización a partir de las siguientes ecuaciones para corriente alterna [Lim, Koo, 2003] y posteriormente se adaptó a la corriente continua [Seo, Khan, Hwang, Lee, Koo, 2015]:

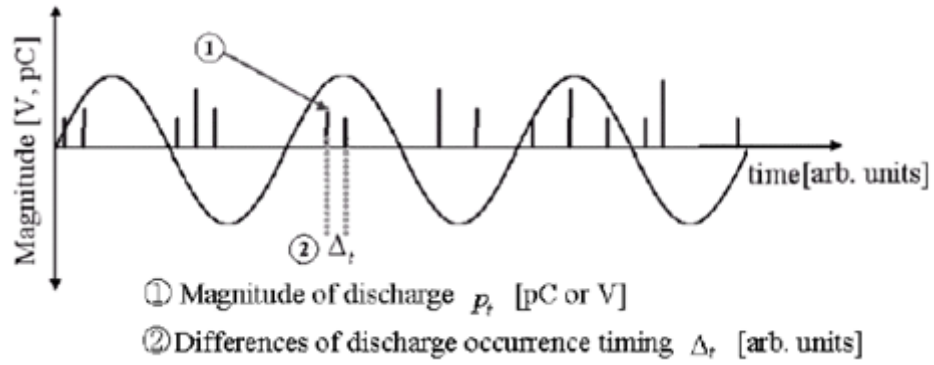


Fig. 52. Idea fundamental y magnitudes básicas para CAPD [Lim, Koo, 2003].

$$(13) P_t^* = \frac{p_t - p_{min}}{p_{max} - p_{min}} (0 \leq P_t^* \leq 1)$$

$$(14) \Delta t^* = \frac{\Delta t}{\Delta t_{max}} (0 \leq \Delta t^* \leq 1)$$

A partir de estas ecuaciones se procede a su normalizado y diferenciación.

$$(15) P_t = P_n^* - P_{n-1}^* (-1 \leq P_t \leq 1)$$

$$(16) Tt(= \Delta t^*) = \frac{\Delta t}{\Delta t_{max}}$$

Los ejes de trabajo elegidos por los autores corresponden a la correlación entre dos pulsos consecutivos, ya sea a través de las magnitudes de descargas consecutivas normalizadas y diferenciadas, como a través del intervalo de tiempo normalizado existente entre descargas consecutivas, es decir P_t y $P_{t+\Delta t}$ ó T_t y $T_{t+\Delta t}$ respectivamente. Así en la Fig. 53 se observa un ejemplo de correlación entre tiempos sucesivos y entre magnitudes de descarga. Después los ejes de cada una de las dos gráficas son asignados acorde a una nueva escala, teniendo como mínimo valor posible el 0 y el máximo el 1, en el caso de obtenerse una repetición en algún valor asignad, el color debe cambiarse [Seo et al. 2015].

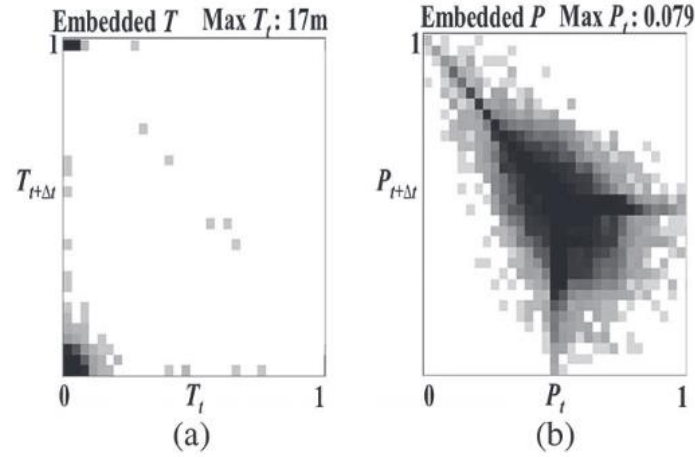


Fig. 53. Ejemplo de a) *Relación entre tiempos consecutivos* b) *relación entre cargas consecutivas* [Seo et al. 2015].

La primera de las descargas a analizar por los autores corresponde a la descarga parcial interna, teniendo en la Fig. 54 a) un patrón triangular en la esquina inferior izquierda mientras que en la Fig. 54 b) se aprecia un triángulo con forma alargada [Seo et al, 2015].

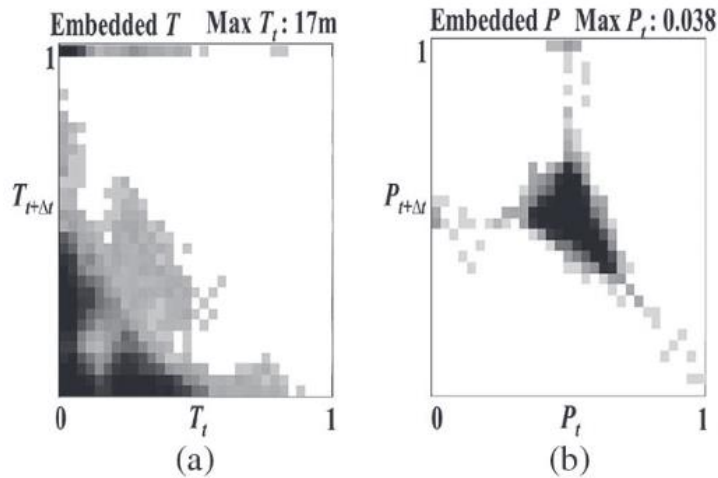


Fig. 54. a) *Relación entre tiempos consecutivos* b) *relación entre cargas consecutivas en descarga parcial interna en CC aplicando 18 kV* [Seo et al., 2015].

La segunda de las descargas corresponde a la descarga superficial reflejándose en la Fig. 55 a) un patrón no uniforme y en la Fig. 55 b) una especie de pequeño triángulo cuyos valores principalmente están reflejados el centro del mismo [Seo et al., 2015].

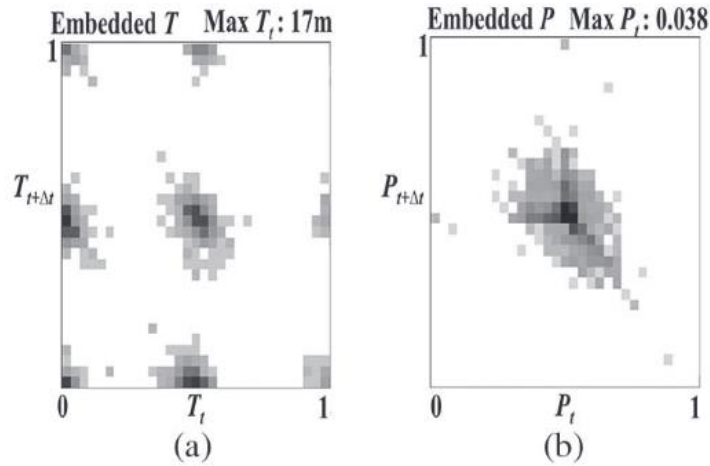


Fig. 55. a) *Relación entre tiempos consecutivos* b) *relación entre cargas consecutivas en descarga parcial superficial en CC aplicando 56 kV* [Seo, Khan, Hwang, Lee, Koo, 2015].

El último de los casos, corresponde a la descarga parcial corona reflejándose en la Fig. 56 a) un patrón en los ejes y en la Fig. 56 b) que la parte principal de la agrupación se encuentra en el centro de la figura, pero resaltando la existencia de un triángulo alargado nuevamente [Seo, Khan, Hwang, Lee, Koo, 2015]:

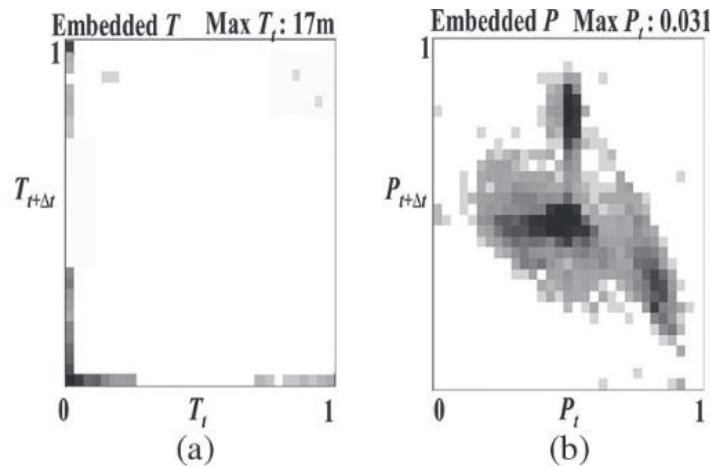


Fig. 56. a) *Relación entre tiempos consecutivos* b) *relación entre cargas consecutivas en descarga parcial corona con CC aplicando 68 kV* [Seo, Khan, Hwang, Lee, Koo, 2015].

Se proyectó una sesión práctica de descargas parciales en corriente continua en los laboratorios de Alta Tensión de la UC3M, se revisaron diversos artículos y se vio que el método más factible de aplicar era el caótico. Se procedió a la toma de datos, se esperó cinco minutos con el fin de una estabilización en el objeto de ensayo, se probaron varios objetos de ensayo pero debido a la velocidad de la aparición de los pulsos fue poco factible realizarse con todos, por lo que se deja como una pequeña muestra de dicha labor el caso

de descarga parcial corona. Aplicando 10,78 kV y realizando la normalización, de tiempos sucesivos (Fig. 57) y para la normalización, diferenciación y la relación de tensiones sucesivas (Fig. 58) a través de las ecuaciones (12-15) de la página 45.

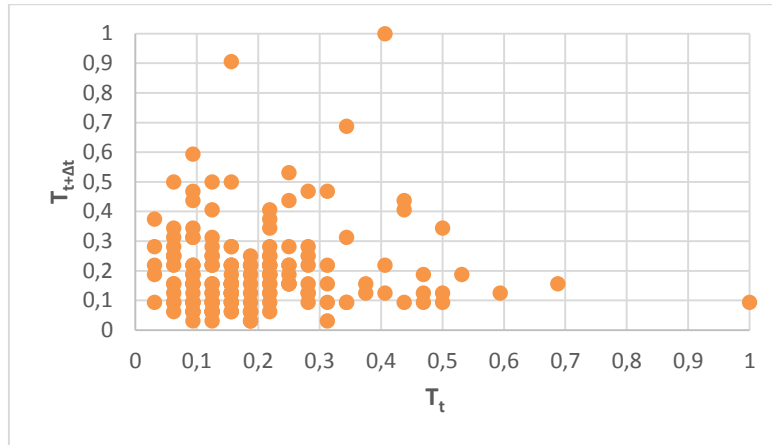


Fig. 57. Relación entre magnitudes de tiempo [Elaboración propia].

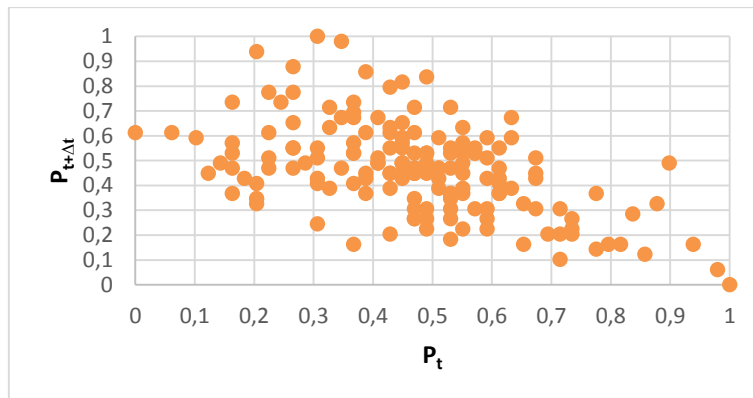


Fig. 58. Relación entre magnitudes de tensión [Elaboración propia].

De la comparación entre las dos gráficas elaboradas a partir de las medidas y las del artículo *Identification of Insulation Defects Based on Chaotic Analysis of Partial Discharge in HVDC Superconducting Cable* no se observa similitud en la gráfica de tiempos y una ligera aproximación en la gráfica de magnitudes de descarga, en el que también se aprecia un triángulo alargado.

4. Conclusiones.

Una vez estudiada la comparación entre las descargas parciales en alta tensión y analizados los resultados de los artículos, se determinan los principios en cuanto a descargas parciales en corriente continua:

- Para la representación de TRPD se puede establecer un patrón de descarga parcial según el tipo de descarga, por lo que es posible una identificación.
- Los estudios estadísticos se realizan de una manera similar en el planteamiento de corriente alterna, cambiando el ángulo de fase por el tiempo de descarga y considerando los tiempos con respecto a la descarga previa y sucesiva.
- Al trabajar con análisis de pulsos consecutivos (PSA), se observa ciertas semejanzas en los patrones de descargas con sus análogos en corriente alterna, aun siendo necesario una mayor tensión para obtener los mismos valores.

A partir de los resultados en los que se ha basado este trabajo se puede extrapolar los datos de la tabla corriente alterna, reflejados en el artículo *Partial Discharge Patterns in High Voltage Insulation* de Illias, Teo Soon, Bakar, Mokhlis y Chen, con los de corriente continua y añadir el análisis caótico CAPD.

Por lo que teóricamente se recomienda, por un lado, el uso de métodos basados en la resolución temporal (TRPD) para estudios estadísticos a partir de los tiempos sucesivos y la magnitud de carga; por otro lado, el método de análisis de secuencia de pulsos (PSA) para la identificación de una secuencia en las descargas parciales, análisis realizado a partir de iteraciones con los valores de tiempo entre descargas y magnitudes de descarga; y finalmente, el análisis caótico (CAPD) también para la identificación de una secuencia, pero siendo normalizada según el máximo y mínimo de los valores. Determinado esto con mayor facilidad en la tabla siguiente:

Método	TRPD	PSA	CAPD
Valores recogidos	Tiempo sucesivo y magnitud de descarga	Iteraciones de magnitudes de descarga	Normalización y diferenciación de tiempos sucesivos y magnitudes de descarga
Ventajas	Posibilidad de estudio estadístico	Posibilidad de identificación de la secuencia	Igual que en PSA con la parte añadida de comparar los máximos y mínimos
Desventajas	Pérdida de secuencia	Imposible estudio estadístico	Igual que en PSA añadiendo la necesidad de una base de datos

Tabla 2. Comparación entre métodos basados en TRPD, en PSA y en CAPD [Elaboración propia].

5. Bibliografía.

ASME, *National Historic Mechanical Engineering Landmarks*, Harlo Printing Co., Michigan, 1980.

Beyer, J., *Space charge and partial discharge phenomena in HVDC devices*, Tesis doctoral dirigida por J.J. Smit. Delft University of Technology, Delft University Press, Netherlands, 2002.

CIGRE, "Recognition of Discharges", *Electra*, no. 11, 1969, páginas 61-98.

Fromm, U., *Partial Discharge and Breakdown Testing at High dc Voltage*, Tesis doctoral dirigida por F. H. Kreuger, Delf University of Technology, Delft University Press, Netherlands, 1995.

Goldstein, J.; Newbury, D. E.; Echlin, P.; Joy, D. C.; Fiori, C.; Lifshin, E., *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis: A Text for Biologists, Materials Scientists, and Geologists*, Springer Science & Business Media, 2013.

Hoof, M.; Patsch, R., "Analyzing Partial Discharge Pulse Sequences - A New Approach to Investigate Degradation Phenomena", *Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 1994, páginas 327-331.

Illias, H.; Teo Soon, Y.; Bakar, A. H. A.; Mokhlis, H.; Chen, G. y Lewin, P. L., "Partial discharge patterns in high voltage insulation" en *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 2012, páginas 750-755.

Kreuger, F.H; Gulski, E; Krivda, A., "Classification of partial discharges" en *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 28 (6), 1993, páginas 917-931.

Kridva, A., *Recognition of discharges: Discrimination and classification*, Tesis doctoral dirigida por F. H. Kreuger, Delf University of Technology, Delft University Press, Netherlands, 1995.

Lim, Y. S., Koo, J. Y., "Comparative Analysis of Partial Discharge Patterns from Different Artificial Defects by Means of Conventional Phase-Resolved Partial Discharge Analysis and a Novel Chaotic Analysis of Partial Discharge" en *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 42, No. 6, June 2003, páginas 755-764.

Long, W.; Nilsson, S., "HVDC transmission: yesterday and today" en *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol.5 (2), 2007, páginas 22-31.

Martínez Tarifa, J. M., *Apuntes de la asignatura Alta tensión*. UC3M, 2013.

Marzinotto, M.; Mazzanti, G., "The Statistical Enlargement Law for HVDC Cable Lines Part 1: Theory and Application to the Enlargement" en *IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society*, vol.22 (1), 2015, páginas 192-201.

Morshuis, P.H.F., *Partial Discharge Mechanisms*, Tesis doctoral dirigida por F. H. Kreuger, Delf University of Technology, Delft University Press, Netherlands, 1993.

Morshuis, P.H.F.; Smit, J.J., "Partial discharges at DC voltage: their mechanism, detection and analysis", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12 (2), 2005, páginas 328-340.

Pihera, J.; Haller, R.; Mráz, P., "Partial discharges evaluation at DC voltage" en *Electric Power Engineering (EPE)*, Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on, 2014, páginas 441-445.

Phung, B. T., *Computer-based partial discharge detection and characterisation*, Tesis doctoral, University of New South Wales, Australia, 1997.

Rogers, E.C.; Skipper, D.J., "Gaseous discharge phenomena in high-voltage d.c. cable dielectrics" en *Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering*, vol. 107 (33), 1960, páginas 241-251

Seo, I.J.; Khan, U. A.; Hwang, J.S.; Lee, J.G. y Koo, J.Y., "Identification of Insulation Defects Based on Chaotic Analysis of Partial Discharge in HVDC Superconducting Cable" en *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25 (3), 2015.

Van Brunt, R. J., "Stochastic properties of partial discharges phenomena" en *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26 (5), 1991, páginas 902-948.

Woodford, D.A., *HVDC Transmission*, Manitoba HVDC Research Center, Canadá, 2005.

Wu, K.; Suzuoki, Y.; Mizutani, T. y Xie, H., "Model for partial discharges associated with treeing breakdown: I. PDs in tree channels", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 33, 2000.

Recursos electrónicos

ABB, *Economic and environmental advantage of HVDC*, 2015.

[<http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/economic-and-environmental-advantages>]
Última consulta: 23/09/2015.

CESI, *Análisis de la necesidad de la nueva interconexión entre Francia y España*, 2008

[http://ec.europa.eu/ten/energy/coordinators/doc/2008_03_18_report_undergrounding_solutions_es.pdf] y

[http://ec.europa.eu/spain/barcelona/images/documents/annexe_es.pdf]. Última consulta: 23/09/2015.

RED ELÉCTRICA ESPAÑOLA, *Proyecto Rómulo*, 2012.

[<http://www.ree.es/es/actividades/proyectos-singulares/interconexion-peninsula-baleares>]. Última consulta: 23/09/2015.

SIEMENS AG, *Proven Technolgy for Power Exchange - High Voltage Direct Current Transmission*

[http://www.siemens.com/about/sustainability/pool/en/environmental-portfolio/products-solutions/power-transmission-distribution/hvdc_proven_technology.pdf]. Última consulta: 23/09/2015.

Normativa

AENOR, *Técnicas de ensayo en alta tensión. Medidas de las descargas parciales*, Mayo 2002, UNE-EN 60720.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *High Voltage Test Techniques: Measurement of Partial Discharges*, 2009, IEC 62478.